

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra měřicí a řídicí techniky

Použití systému PULSE při měření a analýze nf signálů

Using PULSE for NF Signal Measurement and Analysis

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Martin Vaverka

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2601T004 Měřicí a řídicí technika

Téma:

Použití systému PULSE při měření a analýze nf signálů
Using PULSE for NF Signal Measurement and Analysis

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s HW a SW systémem PULSE.
2. Prostudování problematiky měření a analýzy nf signálů.
3. Návrh a realizace demonstrační úlohy.
4. Praktická ukázka měření a zpracování nf signálu.
5. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. NEVŘIVA, Pavel. Analýza signálů a soustav. 1. vyd., Praha : BEN, 2000. 671 s. : il. ISBN 80-7300-004-0.
2. TŮMA J. Zpracování signálů získaných z mechanických systémů. 1. vyd. Praha : Sdělovací technika, 1997. 174 s. ISBN 80-901936-1-7.
3. uživatelský manuál PULSE

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Radovan Hájovský, Ph.D.**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

Rád bych poděkoval vedoucímu své práce panu Ing. Radovanu Hájovskému, Ph. D, za odborné vedení během mé práce. Rovněž bych také rád poděkoval své rodině, za neustávající morální a psychickou podporu.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 7.5.2010

.....

Bc. Martin Vaverka

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je přiblížit čtenářům problematiku průmyslového měření hluku a vibrací za pomoci měřicího systému PULSE firmy Bruel&Kjaer. Měření vibrací je jednou z nejdůležitějších činností zajišťující správný a plynulý provoz průmyslových strojů. Monitorování je pak klíčem k detekování poškozených částí, čímž se může předcházet neočekávaným výpadkům a haváriím ve výrobě. To představuje značný přínos hlavně z hlediska bezpečnosti či ekonomiky. V práci jsou popsány základní pojmy technické vibrodiagnostiky. Seznámíme se s teoretickou analýzou nízkofrekvenčního signálu a jeho dalšího zpracování. Provedeme rozbor některých poruch rotačních strojů a jejich dopady na pozorované spektrum. Praktická část se zaměřuje na statistické vyhodnocení vibračních spekter demonstračních laboratorních úloh a diskuzi výsledků.

Klíčová slova

vibrace, akcelerometr, diagnostika, PULSE, spektrum

Abstract

The aim of this thesis is to clarify the problem of industrial noise and vibration measurement using the measurement system PULSE company Bruel & Kjaer. Vibration measurement is one of the most important activities to ensure proper and smooth operation of industrial machinery. Monitoring is the key to detect damaged parts, which can prevent unexpected failures and accidents in manufacturing. This represents a significant benefit, especially in terms of safety or economy. The work describes the basic concepts of technical Vibrodiagnostics. Familiarize ourselves with the theoretical analysis of low-frequency signal and its further processing. We will examine a number of rotating machinery faults and their effects on the observed spectrum. The practical part focuses on the statistical evaluation of the vibrational spectras of laboratory experiments for demonstration and discussion of results.

Keywords

vibration, accelerometer, diagnostics, PULSE, spectrum

Seznam zkratek

a	Zrychlení
a_{ef}	Efektivní hodnota zrychlení kmitavého pohybu
b	Tlumič s koeficientem tlumení
c	Rychlost šíření vlnění
f	Kmitočet (frekvence)
Δf	Frekvenční rozlišení
f_{vz}	Vzorkovací frekvence
φ	Fázový úhel
g	Tíhové zrychlení
i, j	Imaginární jednotka
k	Tuhost pružiny
l	Délka vodiče
ms	milisekunda
t	Čas
v	Rychlost
v_{ef}	Efektivní hodnota rychlosti kmitání
ω	Úhlový kmitočet
$x(t)$	Spojité signál
y_{ss}	Stojnosměrná složka složeného signálu
y_{ef}	Efektivní hodnota výchylky kmitání
A	Axiální směr
ČSN	Česká technická norma
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
FFT	Rychlá Fourierova transformace
F	Síla
H	Horizontální směr
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
M	Hmota tělesa
N	Počet vzorků
T	Doba kmitu (perioda)
V	Vertikální směr

Obsah

1	Úvod.....	8
2	PULSE (Systém PULSE firmy Brüel&Kjaer)	9
2.1	Co je PULSE	9
2.1.1	Multianalýza v reálném čase	9
2.1.2	Jednoduchost použití	9
2.1.3	Rozšiřitelný, modulární a otevřený.....	10
2.2	Hardware PULSE.....	10
2.2.1	Prostředí.....	11
2.2.2	Napájení.....	11
2.2.3	DC výstup	12
2.2.4	Tichý provoz, chlazení	12
2.2.5	Dispozice	12
2.3	Software PULSE	13
2.3.1	PULSE 9.0	13
2.3.2	Použití PULSE.....	13
2.3.3	Funkce PULSE	14
2.3.4	Obsluha PULSE.....	14
2.3.5	PULSE LabShop verze 9.0 Lite	14
3	Analýza nf signálu	18
3.1	Chvění obecně	18
3.1.1	Zdroje a příčiny chvění.....	18
3.1.2	Podstata mechanického chvění.....	18
3.1.3	Zrychlení, rychlost nebo výchylka chvění.....	19
3.2	Piezoelektrický snímač zrychlení.....	21
3.2.1	Konstrukce snímačů zrychlení.....	22
3.2.2	Charakteristiky snímačů zrychlení	23
3.2.3	Určení polohy a místa upevnění snímače	24
3.2.4	Upevnění snímačů zrychlení.....	24
3.3	Vyhodnocování signálů.....	25
3.3.1	Klasifikace signálů	25
3.4	Fourierova transformace	28
3.4.1	Fourierovy řady	28
3.4.2	Fourierova transformace obecného signálu	29
3.4.3	Rychlá a diskrétní Fourierova transformace.....	30
3.4.4	Rozbor závad rotačního systému podle kmitočtového spektra.....	33
4	Monitorování stavu strojů s využitím vibračních signálů	34
4.1	Základní pojmy	35
4.2	Oblast nízkých kmitočtů.....	39
4.3	Oblast středních kmitočtů.....	44
4.4	Oblast vysokých kmitočtů	45
5	Statistická analýza.....	48
6	Praktická část	52
6.1	Měření otáček HDD	52
6.2	Měření motorku s vrtulkou.....	59
6.2.1	Měření spektra motoru nedeformované vrtulky	60
6.2.2	Měření spektra motoru s malou deformací vrtulky	64
6.2.3	Měření spektra motoru s malou deformací vrtulky a vyvážením (1).....	68
6.2.4	Měření spektra motoru s malou deformací vrtulky s vyvážením (2).....	73
6.2.5	Měření spektra motoru s malou deformací vrtulky s vyvážením (3).....	78

6.2.6	Vyhodnocení vyvažování vrtulky s malou deformací	82
6.2.7	Měření spektra motoru s velkou deformací vrtulky.....	87
6.2.8	Měření spektra motoru s velkou deformací vrtulky s vyvážením (1).....	91
6.2.9	Měření spektra motoru s velkou deformací vrtulky s vyvážením (2).....	96
6.2.10	Měření spektra motoru s velkou deformací vrtulky s vyvážením (3).....	101
6.2.11	Výsledky měření vrtulky s velkou deformací.....	105
7	Diskuze výsledků	110
8	Závěr	113
9	Literatura.....	114

1 Úvod

Tento svět je plný hluku a vibrací. Nejlepším způsobem jak tyto většinou nepříjemné elementy odstranit je dokázat je změřit, analyzovat a správně vyhodnotit. Ne všechny vibrace a hluk jsou však nežádoucí. Jejich využití v průmyslu je naprosto běžné až nezbytné. Zmiňme obory jako letecký a automobilový průmysl, chemický průmysl, zdravotnictví, stavebnictví, audio technika, dále pak rotační zařízení, hřídele, ozubené převody, ložiska a mnoho dalších. Parametry a limity vibrací nebo hluků jsou ale určeny normami a zákony. Při jejich překročení hrozí riziko zničení, poškození zařízení nebo ujma na lidském zdraví. Z toho důvodu, a to nejen tedy z bezpečnostního nebo ekonomického hlediska, je nutná diagnostika těchto zařízení.

Diagnostika mechanických zařízení je většinou zaměřena na pohyblivé části zařízení, které mimo jiné konáním pohybu vyvolávají kmitavé děje. Z toho vyplývá, že nejdůležitějším faktorem, který určuje stav sledovaného mechanického zařízení, je analýza vibrací a hluku. Analýza dalších fyzikálních veličin, jako je teplota, posunutí, rotace, chemické veličiny, zpřesňuje a doplňuje výsledky o stavu sledovaného zařízení. Fyzikální veličiny (například vibrace) naměřené na sledovaném mechanickém zařízení, které jsou důležité pro diagnostiku, jsou převedeny senzory (například akcelerometry, mikrofony) na elektrický signál. Elektrické signály reprezentují fyzikální veličiny získané ze senzorů je nutné analyzovat pro získání informací. Analýza signálů je základním prvkem diagnostických systémů sledujících provoz mechanických zařízení.

První část této práce představuje samotný multi-analyzátor PULSE typu 3560C od firmy Brüel&Kjaer. Je zde uveden jednoduchý popis tohoto zařízení a krátké seznámení s hardwarovým a softwarovým vybavením přístroje.

V druhé části procházím teoretickým úvodem do oblasti zpracování nízkofrekvenčního signálu a to jak v oblasti časové tak v oblasti frekvenční. Nemalá část je věnována rozboru FFT (Fast Fourier Transform) analýzy s uvedením vybraných metod zpracování signálu. Dále jsou zde nastíněny základy konstrukce a manipulace piezoelektrických snímačů zrychlení.

Další kapitoly se věnují tématu analýzy vibračního signálu u monitorovaných stavů strojů a jejich dopadu na pozorované spektrum. Poslední část teoretické části se zabývá krátkým úvodem do statistické analýzy v rozsahu jejího využití v práci.

Praktická část je věnována rozboru vibračního signálu, s uvedením jeho charakteristického chování při různých poruchách a poškozeních sledovaného zařízení jež bude demonstrováno na měřených úlohách a statisticky hodnoceno.

2 PULSE (Systém PULSE firmy Brüel&Kjaer)

2.1 Co je PULSE

PULSE™ je výsledkem vývoje jednoho z nejrozsáhlejších softwarů v oblasti měření a analýzy hluku a vibrací. Cílem bylo vytvoření kvalitního analyzátoru založeného na platformě osobního počítače.

2.1.1 Multianalýza v reálném čase

Schopnost PULSE pracovat v reálném čase znamená možnost sledovat výsledky měření a analýzy okamžitě po změření. To umožňuje kontrolu měření a dat a okamžitě určení možných problémů. Ve spojení s automatizovaným vytvářením výsledných zpráv se PULSE stává nástrojem, který umožňuje velice rychlé získání výsledků měření.

Multianalýza PULSE umožňuje současnou práci a zpracování dat několika různými způsoby analýzy současně, např. FFT analýza, 1/n oktavová analýza (CPB), analýza celkových úrovní a to vše na stejných nebo různých signálech (kanálech) současně s možností zobrazení výsledků a přímého ukládání dat na disk. Tyto ojedinělé vlastnosti dramaticky snižují časy měření a zvyšují kvalitu měření a výsledků. [2]

2.1.2 Jednoduchost použití

PULSE zjednodušuje celý proces měření hluku a vibrací od kalibrace, sběru dat a analýzy až po vytváření výsledných zpráv a reportů. Uživatelské rozhraní PULSE poskytuje jednoduché a logické ovládání filozofie Windows, které může být nakonfigurováno přesně podle požadavků zákazníka. Podle požadavků lze pracovat jak s minimem informací, tak lze rovněž používat složitá nastavení měření se spoustou možností a funkcí.

Všechny informace o nastavení a konfiguraci měření jsou ukládány do tzv. projektů měření a mohou být opakovaně použita pro další měření.

Technologie hardwaru PULSE umožňuje připojení od jednoduchých a nejstarších snímačů až po moderní snímače včetně podpory TEDS.

Tvorba výsledků zpráv a reportů je rychlá a jednoduchá. Stejně jako všechna ostatní nastavení může být report vytvořen a zobrazen pomocí několika kliknutí myši. PULSE umožňuje

zobrazení násobných diagramů současně, vytvářet dynamická propojení s nástroji WORD nebo EXCEL a rovněž lze používat funkce drag&drop pro konfigurace. [2]

2.1.3 Rozšiřitelný, modulární a otevřený

Systém PULSE umožňuje výběr od malých systémů až po rozsáhlá zařízení. Protože je rozšiřitelný, může být optimalizován pro současné požadavky na měření a analýzu a v budoucnosti lze tento systém podle potřeby rozšířit a stávající systém se tak nestává zastaralým. Jednoduše lze rozšířit stávající konfiguraci přidáním dalšího software z neustále rostoucího výběru aplikací pro PULSE. Modularitou softwaru PULSE je myšlena možnost přidání libovolného počtu dostupných softwarových modulů pro další specifická měření a aplikace jakou jsou např. modul pro měření v závislosti na otáčkách nebo software pro kvalitu zvuku nebo lokalizaci zdrojů hluku. Stejným způsobem lze přidávat také hardwarové moduly a rozšiřovat tak možnosti systému.

PULSE lze snadno přizpůsobit a upravit pro požadavky a představy zákazníka. PULSE podporuje technologii OLE a jednotlivé měřicí kroky lze také upravit díky přístupnosti k nástrojům jako jsou C++®, Delphi®, MATLAB™, Visual Basic®, Visual Basic for Applications a další. [2]

2.2 Hardware PULSE

Firma Brüel&Kjaer nabízí mimo jiné celou řadu produktů pro měření, získávání a sběr dat z měření. V laboratoři katedry Měřicí a řídicí techniky VŠB_TU Ostrava je k dispozici Multianalyzátor PULSE 3560C. K tomuto zařízení je zakoupen licenční klíč, který se vztahuje k aplikaci FFT analýzy. V rámci hardwarového vybavení tohoto systému je samotný přístroj, síťový adaptér, propojovací křížový síťový kabel a licenční klíč. Další přibližující informace poskytuje následující text.



Obr. 1: Portable PULSE 3560C

2.2.1 Prostředí

Diskutovaný analyzátor typu 3560C splňuje náročné požadavky na odolnost v drsných elektrických prostředích, které přesahují evropské EMC požadavky ISO 7637-1 a 7637-2. Mechanická odolnost zařízení je rovněž na vysoké úrovni a vyhovuje ustanovením MIL STD 810C a IEC 60068-2-6.

Jelikož všechny přenosné PULSE systémy jsou konstruovány pro venkovní použití musí rovněž splňovat přísné požadavky na odolnost proti působící teplotě a vlhkosti. Rozsah provozních teplot sahá od -10°C do 50°C. Typ 3560C odolává dešti, pokud přední panel směřuje nahoru a je instalován ochranný kryt. [3]

2.2.2 Napájení

Typy 3560B a 3560C mohou být poháněny dvěma vnitřními nikl-metal-hydridovými bateriemi nebo 10V až 32V DC napájením. Jednotku lze zapínat a vypínat z předního panelu, nebo při použití více než jednoho front-end v jednom systému je funkce on/off ovládána jinou front-end pomocí Multiframe Control Signal. Třetí možností je externí DC napájení. Pokud je použito bateriové napájení, ukazatele na předním panelu prezentují stav baterie, a dovolující tak výměnu baterií za provozu bez přerušení měření. Při připojení k externímu DC napájení, jsou baterie nabíjeny automaticky. [3]

2.2.3 DC výstup

K zajištění napájení pro příslušenství jako jsou přepínač sítě LAN nebo bezdrátové sítě WLAN k propojení s více front-end systémy, typu 3560B, C a D mají tyto stanice 5V a 12V DC výstup (LEMO FGG.00.302 konektor) s pojistkou.

2.2.4 Tichý provoz, chlazení

Během provozu udržují ventilátory teplotu uvnitř jednotky v bezpečnostních limitech. Měření v situacích, kdy hluk ventilátoru může ovlivnit výsledky měření, lze tyto ventilátory vypnout softwarem PULSE. Pokud hrozí přehřátí, jsou automaticky znovu zapnuty.

2.2.5 Dispozice

- Robustní pouzdro pro průmyslové a tvrdé každodenní použití
- Vodě odolný kryt na předním panelu umožňuje průchod kabelů
- Provoz na baterie nebo DC napájení (10 - 32 V)
- Chladicí ventilátory lze vypnout pro tichý provoz (auto-restart v případě přehřátí)
- Synchronní vzorkování s jinými PULSE front-end systémy

Typ 3560 C je přenosný systém pro sběr dat napájený baterií přes DC adaptér typu 2827. Může mít libovolnou kombinaci Controller modulu a Input/Output modulu. Kontrolní modul zajišťuje komunikaci s PC, zatímco vstupně/výstupní modul zpracovává vstupní měření a poskytuje vzorkovací hodiny. Typ 3560 C je vybaven 5/1 kanály. [3]

2.3 Software PULSE

V rámci softwarového vybavení, které mi univerzita poskytla byla aplikace PULSE version 9.0 2004-12-18 s knihovnami PULSE Knowledge Library a uživatelským manuálem PULSE-Getting Started. Uvedená softwarová aplikace obsahuje řadu vylepšení oproti starším verzím. Následující text reprezentuje výpis některých inovací i stávajícího vybavení aplikace.

2.3.1 PULSE 9.0

- Nový PULSE Time (možnost práce s více souborovými formáty)
- Toleranční křivky
- Možnost vymazání posledního průměru (krok zpět)
- Grafické trigger
- Časové značky podle IRIG-B
- Aplikace pro zpracování DC kanálů 7769 zahrnuta v základním softwaru
- Aplikace pro export do Matlabu 7755A zahrnuta v základním softwaru
- Kurzory v GCX
- Výpočet Field Pass-by z disku
- Široké možnosti kopírování v PULSE Data Manager
- Nový hardware (Pulse Lite, Pulse 3560B s plným generátorem)

2.3.2 Použití PULSE

- Základní akustický analyzátor
- Základní analyzátory vibrací
- Jednoduché vibrační analýzy (FFT) (strojní zařízení vibrace)
- Impact testování (FFT) (rezonance)
- CPB analýza (1 / 1 Octave, 1 / 3 Octave)
- Katalog hodnocení hluku (FFT nebo CPB)
- Run-up/Run-down analýza (FFT)
- Přechodová analýza (FFT nebo CPB) (analýza non-stacionárních signálů)

2.3.3 Funkce PULSE

- Originální snadnost použití se scénářově-orientovaným uživatelským rozhraním
- Inteligentní analýza-nastavení výchozí nastavení vhodné pro většinu aplikací
- Kompaktní funkce
- Jednoduchá a efektivní správa dat
- Dálkové ovládání systému pomocí bezdrátové rozhraní LAN pro těžko dostupná nebo nebezpečná prostředí
- Snadná integrace s MS Excel ® pro post-processing dat
- Růstový potenciál - kompatibilita s rodinou PULSE umožňuje snadný upgrade

2.3.4 Obsluha PULSE

Neexistuje žádná standardní metoda pro obsluhu PULSE, protože tato modulární platforma umožňuje uživatelsky definovaná nastavení a procedury. Dá se říct, že existuje tolik metod obsluhy PULSE, kolik je jeho uživatelů.

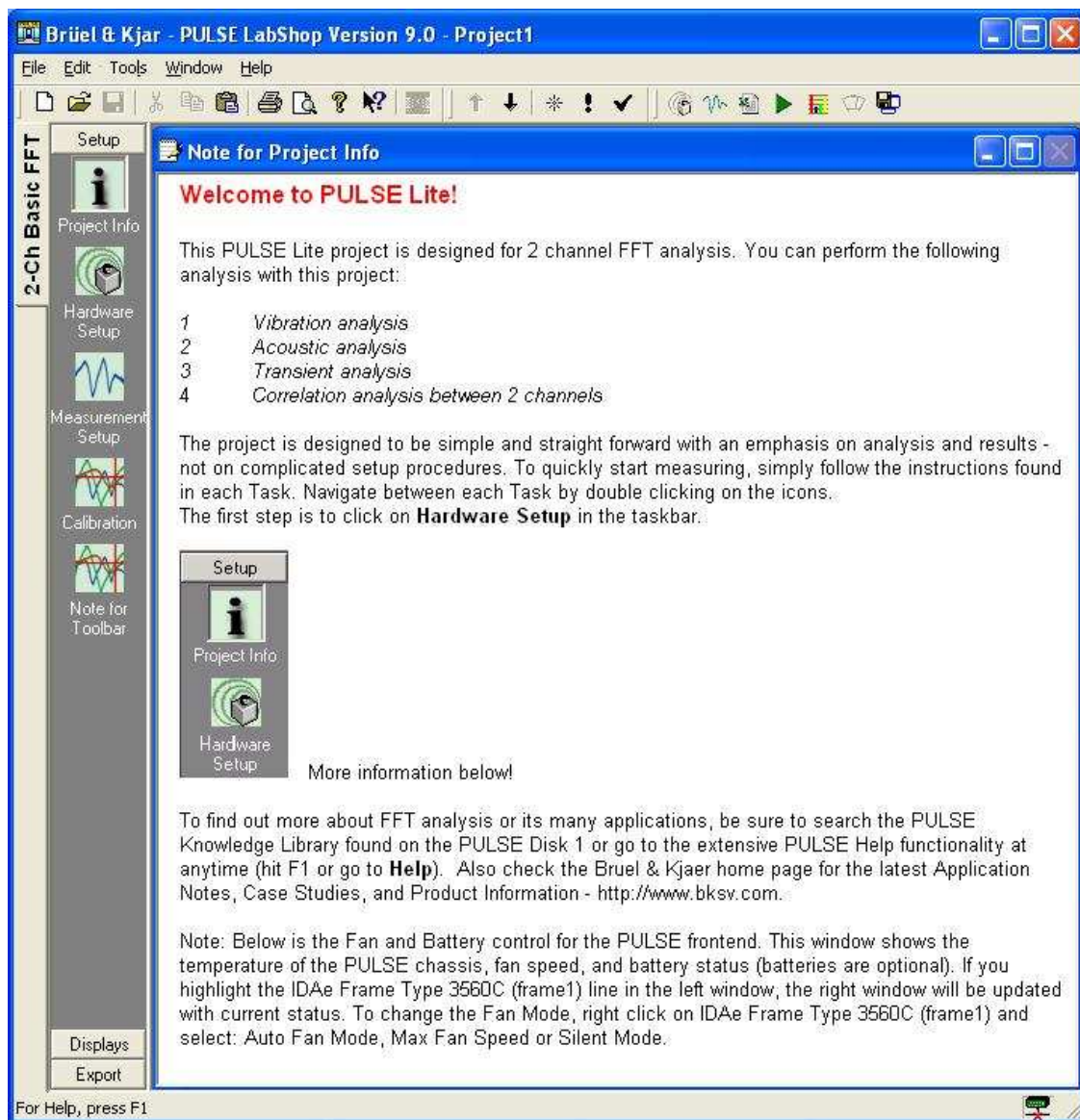
Jeden z nejběžnějších a ověřených způsobů ovládání projektů PULSE spočívá v použití organizátorů (Organisers) společně s panely nástrojů, přepínacími tlačítky, příkazovými tlačítky a místními nabídkami. [5]

Většina procedur měření může být rozepsána v následujícím logickém pořadí:

1. Nastavení snímačů
2. Základní měření a analýza
3. Následné zpracování naměřených dat
4. Zobrazení výsledků
5. Reporty a dokumentace výsledků

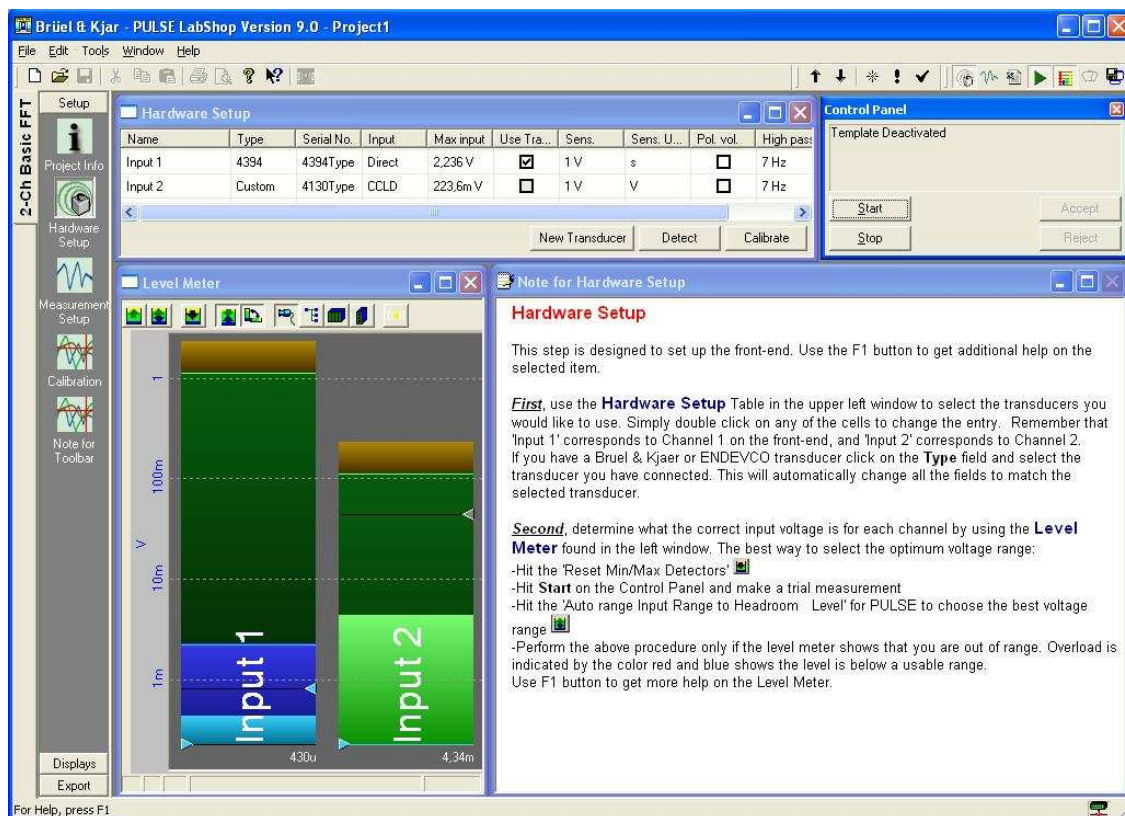
2.3.5 PULSE LabShop verze 9.0 Lite

Toto prostředí je v nabídce licenčního klíče zakoupeného univerzitou. Jak bude popsáno dále, je zde možnost nastavení základních kroků před samotným měřením. Jedná se například o volbu a kalibraci připojovaného senzoru nebo hladiny jeho citlivosti, určení rozlišení FFT analyzátoru nebo nastavení horního kmitočtového rozsahu pro FFT analyzátor. Na následujících obrázcích je vidět postup inicializace analyzátoru pro měření.



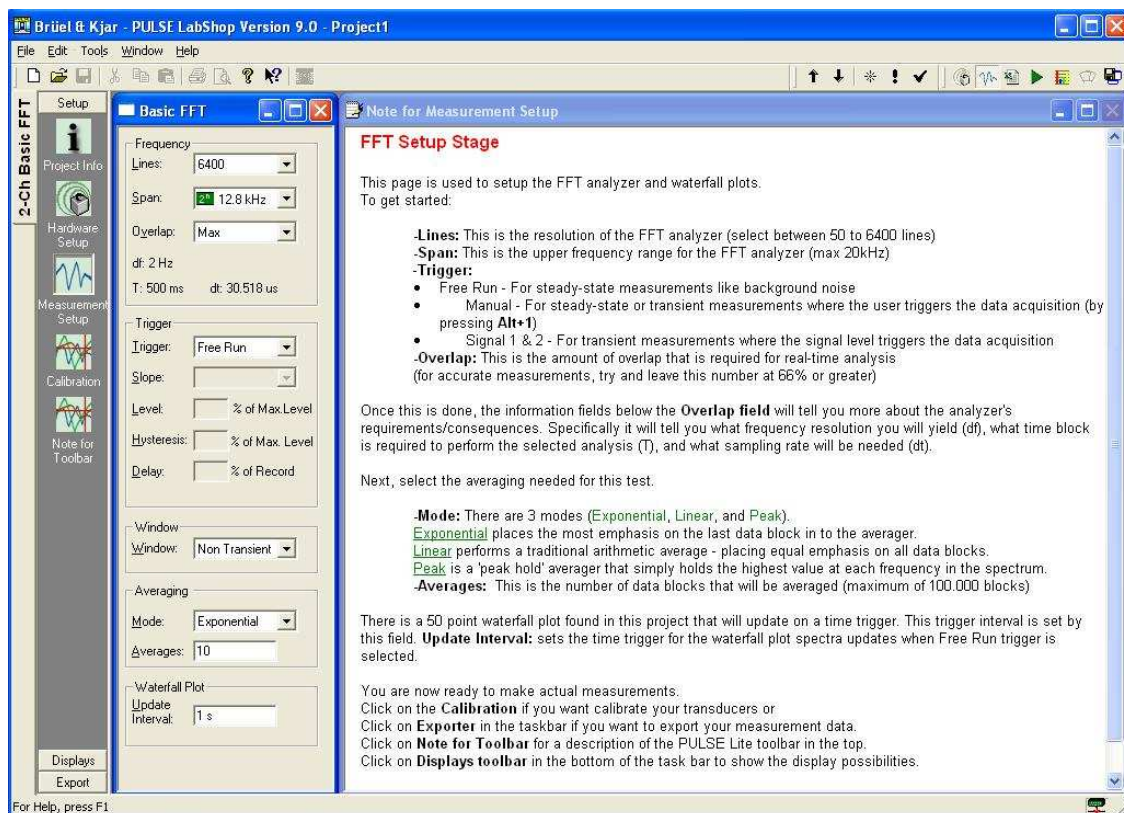
Obr. 2: Založení nového projektu

Po spuštění programu PULSE LabShop se provede automatická inicializace aplikace a analyzátoru. Jakmile je inicializace ukončena, objeví se úvodní informace o projektu. Obsahuje možnosti měření pro licencovanou verzi dvou-kanálového základního FFT měření. Jako například vibrační a akustickou analýzu, přechodovou analýzu nebo korelační analýzu signálů. Dále potom nápovědu HELP pomocí rozšířeného hledání v Knowledge Library. Následuje hardwarové nastavení analyzátoru.



Obr. 3: HW nastavení PULSE

V druhém kroku programového nastavení je Hardware Setup. Zde se provádí volba připojovaných senzorů, v mém případě tedy akcelerometru typu 4394 a měřícího mikrofону. Okno hardwarového nastavení senzorů nabízí i další možnosti individuálních vlastností. Jsou to například nastavení jména vstupu, typ a model senzoru, definování napájení vstupu nebo citlivosti vstupu atd. Další okno s názvem Level Meter určuje korektní vstupní napětí přivedené na vstupní zařízení, tj. akcelerometr nebo mikrofón. Hladiny vstupů by neměli dosáhnout červené úrovně (přebuzení vstupu).



Obr. 4: Nastavení měření Basic FFT

Další okno v nastavení měření je pro základní FFT analýzu (Basic FFT). Začíná se nastavením frekvence. Jedná se o rozlišení (Lines) FFT analyzátoru, horní kmitočtový rozsah analyzátoru (Span) a velikost překrytí pro real-time analýzu (Overlap). Dále je to pak nastavení triggování, okna (Windows) a průměrování (Averaging), které udává velikost datových bloků, které budou průměrovány. Averaging má tři módy, a to exponenciální, lineární a špičkové.

Tato část se vztahovala pouze k inicializaci analyzátoru a jeho základnímu nastavení. Rovněž seznamuje s programovým prostředím určeném pro zobrazování výsledků měření. To bude ukázáno v praktické části.

V současné době je tento software nahrazen novějšími verzemi s mnoha dalšími inovacemi a celkovým programovým vybavením. Na stránkách výrobce je dostupná verze PULSE 14.

3 Analýza nf signálu

3.1 Chvění obecně

Vyhnout se mechanickému chvění v praxi je téměř nemožné. Hlavními příčinami mechanického chvění jsou dynamické síly, procházející výrobní nepřesností dílů a součástí, vůle pohyblivých součástí, styk dílů se třením a odlamováním a nevyváženost součástí a dílů s rotačním, kmitavým, kývavým a vratným pohybem. Slabé chvění může často vyvolávat rezonance jiných součástí a dílů a tak se stát zdrojem silného mechanického chvění a hluku. [4]

3.1.1 Zdroje a příčiny chvění

Mechanické chvění však také může plnit užitečné funkce. Uměle buzené mechanické kmity tvoří základ práce vibračních podavačů a dávkovačů, betonářských pýchovačů, ultrazvukových čistících van, pneumatických sbíječek, vrtaček a beranidel. Běžně se také používají vibrátory, které přenášejí přesně definované mechanické kmity na různé výrobky, strojní části atd. a umožňují tak jejich zkoušení, zjišťování fyzických a funkčních charakteristik a určování jejich odolnosti vůči vlivům vnějšího prostředí, zejména vlivům mechanického chvění.

Základním požadavkem při jakékoli práci s mechanickými kmity a chvěním, ať již při návrhu a konstruování zařízení, využívajících jejich energie, nebo v procesu projektování a provozu stroje a zařízení s klidným chodem, je možnost přesného a reprodukovatelného měření a analýzy jejich základních veličin. [4]

3.1.2 Podstata mechanického chvění

Chvění je kmitavý pohyb pevných těles kolem určité, zpravidla rovnovážné polohy. Počet plných cyklů kmitavého pohybu za s se nazývá kmitočet a vyjadřuje se v Hz (hertz).

Kmitavý pohyb může být jednoduchý a obsahovat jen jednu složku s určitým kmitočtem (například pohyb ladičky), nebo složený s obsahem většího či menšího počtu složek s různými kmitočty (například pohyb pístu spalovacího motoru).

Mechanické chvění zpravidla obsahuje velký počet složek, vyskytujících se současně na mnoha kmitočtech, takže na základě pouhého pozorování časového průběhu jeho amplitud nelze určit ani počet, ani kmitočty jednotlivých složek.

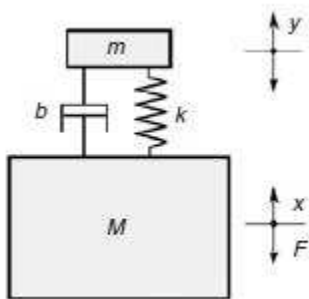
Jednotlivé složky mechanického chvění mohou zjištěny pouze ze závislosti jeho amplitud na kmitočtu. Rozklad složeného chvění na kmitočtové oblasti se nazývá kmitočtová analýza a je jednou ze základních metod v oboru měření chvění a bezdemontážní diagnostiky. Výsledkem kmitočtové analýzy jsou kmitočtová spektra. Grafickou formou závislostí amplitud chvění na kmitočtu jsou spektrogramy.

Kmitočtová analýza chvění mechanismů, strojů atd. obvykle odhaluje řadu výrazných kmitočtů periodických složek, majících přímý vztah k základním pohybům různých dílů a částí zkoumaného či zkoušeného zařízení. Z toho plyne, že kmitočtová analýza umožňuje nebo alespoň ulehčuje odhalování a zjišťování zdrojů a příčin nežádoucích chvění. [4]

3.1.3 Zrychlení, rychlost nebo výchylka chvění

Prvotním, co může následně i zcela znehodnotit naše snažení, je určení, zda v daném případě jde o vibrace relativní nebo absolutní, což vede k výběru příslušného typu snímače. Zatímco absolutní vibrace popisují pohyb sledovaného tělesa (části stroje nebo zařízení) zpravidla vzhledem k Zemi, při relativním měření jde o pohyb vzhledem k uměle vytvořené, resp. vhodně zvolené základně. Takovou základnou je často rám stroje, který sám může ještě různě kmitat vzhledem k zemskému souřadnému systému.

Mechanické kmitání určují vedle frekvence společně výchylka, rychlost a zrychlení, které jsou navzájem závislé. Principiální pro funkci snímače vibrací je pohyb seizmické hmoty s hmotností m vzhledem k objektu o hmotnosti M , jehož vibrace se měří.



Obr. 5: Obecný princip snímače vibrací

Ideálně platí

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = F_b = M\ddot{x} \quad (1)$$

kde

y	je výchylka,
\dot{y}	rychlost,
\ddot{y}	zrychlení (pohybu seizmické hmoty snímače vzhledem ke sledovanému objektu),
\ddot{x}	zrychlení objektu,
m	hmotnost seizmické hmoty snímače,
M	hmotnost objektu,
k	tuhost pružiny,
b	součinitel tlumení,
F_b	budicí síla

Na základě tohoto modelu lze vhodnou volbou hodnot jeho parametrů m , b a k vytvořit snímač kterékoliv z charakteristických veličin kmitavého pohybu, tedy výchylky, rychlosti a zrychlení.

Pro snímače výchylky mají výrazně velkou hmotnost m při zanedbatelném tlumení b a tuhosti k , čímž přejde vztah (1) do podoby

$$m\ddot{y} = M\ddot{x} \Rightarrow y \approx x \quad (2)$$

Snímače výchylky (polohy, posunutí) kmitajícího tělesa lze obecně sestavit na principu indukčním, indukčnostním, kapacitním, magnetickém nebo optickém. Ve vibrodiagnostice se v současné době nejčastěji používají snímače indukčnostní, které využívají závislost indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Vzhledem k vysokofrekvenčnímu principu jde o snímače citlivé na parazitní vlivy, jako jsou např. délka kabelu, vnější elektromagnetická pole atd.

Pro snímače rychlosti je při dominantním tlumení b a zanedbatelně malé hodnotě m a k přetransformován vztah (1) na

$$b\dot{y} = M\ddot{x} \Rightarrow y \approx \dot{x} \quad (3)$$

Elektrodynamický snímač podle *obr. 3* je sice principiálně absolutním snímačem amplitudy kmitavého pohybu, ale vzhledem k vnitřnímu uspořádání je při mechanicko-elektrické transformaci signálu přímo vyhodnocována rychlost kmitání jeho pouzdra. Elektrodynamické

snímače mají mnoho předností, avšak nad nimi převažují omezení horní hranicí použitelnosti do frekvence maximálně 3,5 kHz spolu s velkou citlivostí na okolní magnetická pole.

Při výrazné velké tuhosti k oproti zanedbatelné hmotnosti m a tlumení b lze rovnici (1) převést do podoby

$$ky = M\ddot{x} \Rightarrow y \approx \ddot{x} \quad (4)$$

a tomuto vyjádření je poplatný i v současné v praxi nejčastěji používaný snímač zrychlení využívající ke snímání pohybu seizmické hmoty piezoelektrický jev (tzv. piezoelektrický akcelerometr). Zpravidla jde o absolutní snímač kmitání. Z principu lze u něj snadno splnit podmínku $m \ll M$, přičemž se současně předpokládá až nekonečně tuhé připojení akcelerometru ke sledovanému objektu.

Výběr měřené veličiny je důležitý zejména při neopakovatelných měřeních v širokém kmitočtovém pásmu a zvláště pak při měření složitých kmitů s mnoha kmitočtovými složkami. Měření výchylky v takových případech zdůrazňuje vliv složek s nízkými kmitočty a naopak, měření zrychlení vede ke zdůrazňování složek s vysokými kmitočty. [6]

3.2 Piezoelektrický snímač zrychlení

Elektromechanický měnič, v současné době více či méně běžně užíván k měření chvění, je piezoelektrický snímač zrychlení (akcelerometr). Piezoelektrický snímač zrychlení předčí v mnoha směrech jiné typy snímačů chvění. K jeho přednostem patří široký pracovní kmitočtový a dynamický rozsah, definovaná linearita v těchto rozmezích, pevná a robustní konstrukce, vysoká spolehlivost a dlouhodobá stabilita.

Velkou výhodou piezoelektrických snímačů zrychlení je také to, že patří k aktivním měničům, generujícím elektrický signál a tudíž nepotřebujícím vnější napájení zdroj. Tyto snímače nemají pohyblivé části citlivé k opotřebení. Elektrický výstupní signál těchto snímačů, úměrný zrychlení mechanického chvění, je možno integrovat odpovídajícími elektronickými zařízeními a získávat tak elektrické signály, úměrné rychlosti a výchylce chvění.

Základním prvkem piezoelektrického snímače zrychlení je výřez z piezoelektrického materiálu, zpravidla z uměle polarizované piezoelektrické keramické hmoty, vykazující

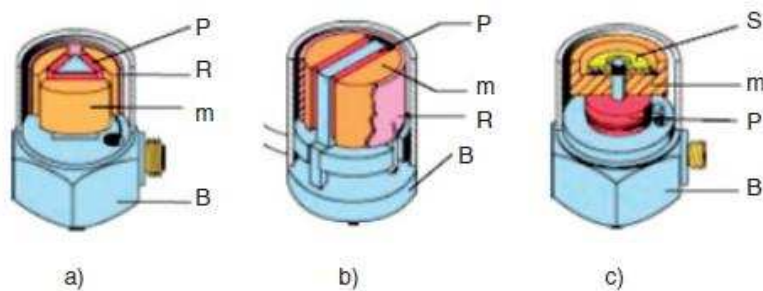
výrazný piezoelektrický jev. Podstatou tohoto jevu je vznik elektrického náboje na čelních stěnách výřezu z piezokeramiky při jeho mechanickém namáhání v tahu, tlaku či střihu. Vznikající elektrický náboj je úměrný přiložené mechanické síle. [4]

3.2.1 Konstrukce snímačů zrychlení

Konstrukčně jsou piezoelektrické akcelerometry řešeny velmi často se smykovým namáháním piezokrystalu, méně často tradičním tlakovým namáháním. V současnosti se velmi často používá konstrukce typu Delta Shear[®] se třemi dvojicemi piezokrystalů a setrvačných hmot upevněných na trojbokém středovém sloupku s použitím předepnutého prstence (*obr. 6a*), což současně zaručuje velmi dobrou linearitu. Snímače s tímto uspořádáním se vyznačují velkou citlivostí, malou hmotností a vysokou vlastní frekvencí. Předností je také oddělení základny snímače od vlastního snímacího mechanismu, což umožňuje vyrábět snímače použitelné i při vyšší teplotě a s větší odolností proti mechanickému namáhání.

Konstrukce označovaná jako Planar Shear je svým principem velmi podobná předchozímu typu, ale jsou zde použity jen dvě dvojice krystalů a setrvačných hmot na plochém středovém sloupku (*obr. 6b*). Veškeré přednosti jsou shodné s předchozím, pouze citlivost je menší, a právě to se může v některých případech negativně odrazit i na výsledné přesnosti měření, jak ukážou budoucí analýzy nejistot.

Jednoduchou klasickou konstrukci představuje snímač s centrálním tlakovým namáháním (*obr. 6c*), vyznačující se menší citlivostí při větší hmotnosti setrvačné hmoty snímače. Piezoelektrický krystal a setrvačná hmota jsou namontovány na válcovém středovém nosníku s použitím předepjaté diskové pružiny. Nedostatkem této konstrukce je ovlivnění signálu ze snímače změnami tvaru a namáhání jeho základny, což lze kompenzovat speciálními materiály, ale i přesto se tyto snímače řadí k typům s většími nejistotami. K měření zpravidla používají větší amplitudy chvění a rázů, kdy výstupní signál má dostatečný odstup od šumu způsobeného vnějšími vlivy. Uplatní se také jako referenční snímače při kalibraci, kde jsou vnější podmínky řízeny a stabilizovány (základna snímače se přitom často zpevňuje vložením beryliové destičky). [6]



Obr. 6: Základní konstrukční uspořádání piezoelektrických akcelerometrů:

a) Delta Shear[®] b) Planar Sudar c) s centrálním tlakovým namáháním

(B - těleso snímače, m -seismická hmota, P - piezoelektrický prvek, R - přepínací prstenec, S - přepínací disk)

3.2.2 Charakteristiky snímačů zrychlení

Citlivost, někdy také označována jako činitel přenosu, snímače je zpravidla jedním z jeho nejdůležitějších parametrů. S hlediska citlivosti je ideální snímač, generující co největší elektrický signál již při poměrně malých zrychleních chvění. Avšak již zde je nutný první kompromis, protože splnění požadavku vysoké citlivosti zpravidla znamená použití poměrně velkého piezoelektrického členu a tedy nevyhnutelné zvýšení celkových rozměrů a váhy snímače.

Ve většině normálních případů však citlivost snímače zrychlení není kritická, protože moderní předzesilovače umožňují zpracování i velmi slabých elektrických signálů. Vlastní hmota snímačů zrychlení nabývá na vážnosti při měření chvění lehkých a křehkých objektů, protože již i poměrně malá přidaná hmota může mít podstatný vliv na amplitudy i kmitočty mechanických kmitů v jednotlivých měřících bodech. Podle obecně platného praktického pravidla vlastní hmota snímače zrychlení nemá být větší než 1/10 dynamické hmoty objektu, na němž je snímač upevněn.

Při měření velmi malých nebo velmi velkých zrychlení chvění je nutno brát v úvahu pracovní dynamický rozsah použitého snímače. Dolní hranice celkového dynamického rozsahu zpravidla není určována přímo snímačem zrychlení, nýbrž elektrickým šumem použitých spolu s ním kabelů a předzesilovače. Při použití univerzálních přístrojů a běžného příslušenství má dolní mez pracovního dynamického rozsahu řádovou hodnotu několika setin m/s^2 .

Horní mez pracovního dynamického rozsahu je určena mechanickou pevností snímače zrychlení. Typický univerzální snímač zrychlení si zachovává linearitu až do 50 000- 100 000 m/s², tj. do rozsahu normálních mechanických rázů. Speciální snímače zrychlení, určené k měření mechanických rázů, mohou pracovat jako lineární měniče až do hodnot kolem 1000 km/s² (100 000 g). [4]

3.2.3 Určení polohy a místa upevnění snímače

Snímač zrychlení se upevňuje tak, aby směr, ve kterém se provádí měření, odpovídal směru osy maximální citlivosti snímače. Piezoelektrické snímače jsou také citlivé ke kmitům v příčných směrech, avšak tuto tzv. příčnou citlivost je možno ve většině případů zanedbat, protože její normální hodnoty nepřesahují 1% citlivosti ve směru hlavní osy. [4]

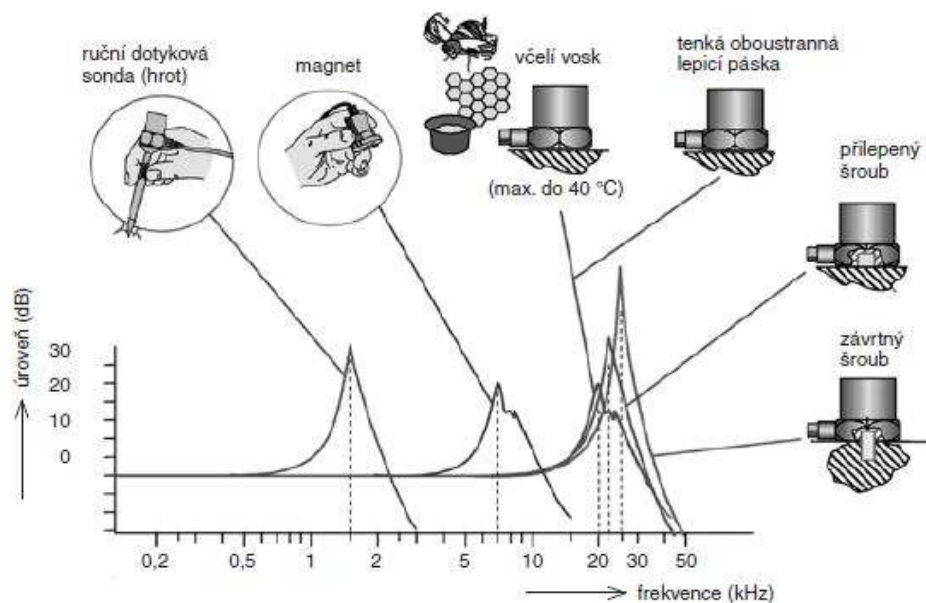
3.2.4 Upevnění snímačů zrychlení

Způsob upevnění snímače zrychlení k měřenému objektu je jedním z nejzávažnějších činitelů, ovlivňujících celkovou přesnost praktických měření chvění. Nedokonalé upevnění snižuje rezonanční kmitočet upevněného snímače zrychlení a tudíž výrazně zmenšuje jeho použitelný pracovní kmitočtový rozsah. Nejlepších výsledků se dosahuje při upevnění pomocí speciálních šroubů na rovném a hladkém povrchu. Dosahovaný rezonanční kmitočet leží velmi blízko ideálního rezonančního kmitočtu (32 kHz) snímače při cejchování. K upevnění snímačů zrychlení se v praxi používá i tenká vrstva včelího vosku. Resonanční kmitočet dosažený tímto způsobem upevnění je 29 kHz. Oblast použití tohoto upevnění je omezená teplotou měknutí vosku, ta je přibližně 40°C.

Tam, kde se předpokládá opakované měření v totožných bodech a kde jsou z nějakého důvodu nežádoucí otvory se závitem pro upevňovací šrouby, nejlepším řešením je použití speciálních šroubů, připevněných k povrchu měřeného objektu vhodným tvrdým pojivým materiálem. (tmelem, lepidlem atd.). Jako pojivý materiál se doporučují epoxidové pryskyřice a kyanoakryláty.

Speciální izolované šrouby a slídové podložky se používají tam, kde je nutná elektrická izolace snímačů zrychlení. Upevnění s elektrickou izolací také pomáhá při obtížích spojených s uzemněním.

Velmi jednoduchou pomůckou k upevnění snímače zrychlení na hladkém povrchu objektů z magnetických materiálů je malý permanentní magnet, zajišťující současně elektrickou izolaci snímače. Nevýhodou tohoto způsobu upevnění je značné snížení rezonančního kmitočtu upevněného snímače a jeho nevhodnost k trvalému použití při měření v kmitočtovém pásmu od 2 kHz výše. [4]



Obr. 7: Vliv působení uchycení snímače na jeho amplitudovou frekvenční charakteristiku

3.3 Vyhodnocování signálů

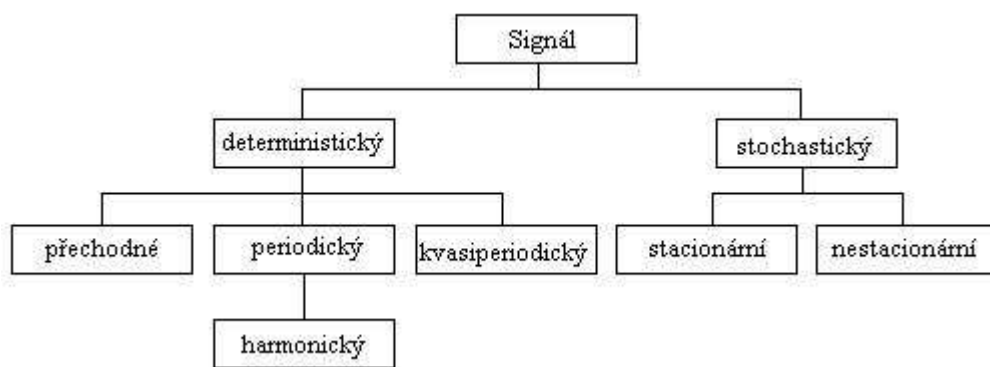
U signálů lze snímat souhrnné charakteristiky nebo frekvenční spektra. Souhrnnou charakteristikou je např. hladina hluku nebo vibrací ve zrychlení nebo rychlosti. Tato hladina je efektivní hodnotou signálu. Frekvenční spektrum, které lze zkráceně označit jen slovem spektrum, představuje velmi zjednodušeně podíl jednotlivých „čistých“ tónů ve hluku nebo jinak také harmonických složek v obecném signálu. Spektrum je funkcí frekvence. Podle matematické definice je to obecně spojitá funkce. [1]

3.3.1 Klasifikace signálů

Abstraktní pojem „signál“ se obvykle vztahuje jen na takové časové funkce, které reprezentují časové průběhy fyzikálních veličin a které obsahují na rozdíl od šumu jen smysluplné informace. V tomto případě bude signál zobecněn na jakoukoliv časovou funkci, tj. také na

náhodný šum, který popisují statistické charakteristiky. Tyto statistické charakteristiky představují také určitou informaci o objektu, který signál generuje.

Klasifikace signálů je přehledně znázorněna na obrázku. Na nejvyšší úrovni jsou signály rozděleny na deterministické a náhodné. Deterministický signál je takový, jehož časový průběh je determinován (např. funkčním předpisem), a proto lze jeho průběh předvídat. Náhodný signál má v průběhu záznamu nepředvídatelný vývoj. Po záznamu se mohou některé složité deterministické signály jevit jako náhodné. Skupina deterministických signálů má tři podskupiny. Přechodné signály jsou časově omezeny, zatímco periodické a kvasiperiodické signály trvají nekonečnou dobu. Mezi přechodné signály, které představují záznam přechodového děje, se řadí například odezva na impulsní buzení, hluk při přeletu letadla a při přejezdu vozidla. Z nulové úrovně nebo ustáleného stavu je tento signál vybuzen a k nulové úrovni nebo ustálenému stavu se vrátí. Periodické signály mají důležitou podskupinu, a to harmonický signál, kterým je sinusovka. Periodický signál je složen z harmonických signálů o frekvencích, které jsou násobkem jedné základní frekvence. Kvasiperiodický signál je složen také z harmonických signálů s frekvencemi, které jsou na rozdíl od periodického signálu násobky aspoň dvou základních frekvencí se vzájemným poměrem o velikosti, která je rovna iracionálnímu číslu.



Obr. 8: Klasifikace signálů podle náhodnosti jejich průběhu

Stochastické signály se dělí na dvě podskupiny, a to stacionární a nestacionární. Kritérium dělení podle stacionárnosti je bez vztahu k úzké definici tohoto pojmu pro náhodné signály. V tomto místě lze s vědomím nepřesnosti uvést, že průběh signálu má ustálený – stacionární – charakter nebo jeho charakter se v čase mění, tj. je nestacionární. Charakter průběhu signálu se může jevit za delší časové období za ustálený, zatímco za krátký časový interval jako neustálený.

U signálů stochastických (náhodných) je třeba zmínit dvě speciální skupiny, a to signály úzkopásmové a širokopásmové. Úzkopásmový náhodný signál je složen jen ze složek, které představují harmonické signály s frekvencemi z úzkého pásma, které je vzdálené od nulové frekvence. Spektrum tohoto signálu obsahuje jeden vrchol. Ve svém časovém průběhu obsahuje úzkopásmový signál kmity o málo proměnlivé frekvenci, avšak s náhodile se měnící amplitudou. Širokopásmové signály jsou zcela náhodné bez stálé frekvence změn a jsou charakteristické tím, že jsou složeny z harmonických signálů s frekvencemi z širokého pásma frekvencí. Zcela náhodný signál je označován za šum.

Deterministický signál je obvykle v různém poměru smíšen se signálem náhodným. Náhodná složka tohoto signálu je dána kvantovacím šumem převodníků a dalšími zdroji na měřeném strojním zařízení. [1]

Strojní zařízení jsou zdrojem signálů, které mohou být souhrnně označeny za periodické nebo kvasiperiodické, což je dáno buzením periodickou činností jejich komponent, jako jsou ozubená kola, ložiska nebo u spalovacích motorů zážehy zápaly paliva apod. Buzení silovými impulsy nebo kinematicky se přenosem mechanickou strukturou ke snímači různě zesiluje. Jestliže mechanický systém je složen z jedné dominantní hmoty, která je uložena pružně, pak jediná rezonanční frekvence způsobí, že po vybuzení širokopásmovým náhodným signálem vznikne úzkopásmový náhodný signál, např. síly. [1]

Jiné dělení signálu vyplývá z jejich rozměru ve smyslu toho, zda jde o skalární nebo vektorovou funkci času. Většina signálů je jednorozměrných, tj. v určitém časovém okamžiku jsou charakterizovány jediným údajem nezávisle na tom, jestli tento údaj představuje např. sílu v určitém směru, přestože síla je vlastně ve fyzice vektor. Zde se akcentuje počet souřadnic, které signál charakterizují. Pro jednorozměrné signály vystačí reálná funkce času. Tato okolnost je zdůrazněna z toho důvodu, že při definici analytického signálu se k jeho reálné části uměle vytvoří imaginární část, která z prostého signálu vytvoří analytický signál, který představuje mocný nástroj k demodulaci signálů.

Signál se dvěma souřadnicemi popisuje v každém okamžiku dva údaje, které lze interpretovat jako komplexní číslo. Jedna souřadnice je reálná část komplexního čísla a druhá souřadnice je jeho imaginární část. Tento signál je komplexní funkcí času. Tyto signály jsou používány v diagnostice zejména velkých rotorových soustav, jako jsou turbíny, kompresory apod. [1]

3.4 Fourierova transformace

Průběh signálu se obvykle znázorňuje v čase, jinak řečeno v časové oblasti – doméně. Posuzování časového průběhu signálu vhodně doplňují i jeho vlastnosti prezentované rozkladem na soubor elementárních funkcí. Nejpřirozenější pro technické aplikace nejen v oboru kmitání mechanických systémů je rozklad na soubor harmonických funkcí, které se liší amplitudou, úhlovou frekvencí a svou počáteční fází. Jestliže se u souboru harmonických signálů znázorní závislost amplitudy a počáteční fáze na frekvenci, pak je signál znázorněn ve frekvenční oblasti – doméně. Rozklad periodické funkce se spojitým časem na kombinaci harmonických signálů se nazývá Fourierova (nekonečná) řada. Pro obecné neperiodické funkce se používá Fourierova transformace. [1]

3.4.1 Fourierovy řady

Periodická funkce je charakterizována rovností vzájemně posunutých funkčních hodnot $x(t) = x(t + iT)$, kde T je perioda a $i = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ je její násobek. Do tvaru (bodově) konvergentní Fourierovy nekonečné řady lze rozvinout tuto funkci, $x(t)$, za podmínky, že je po úsecích hladká, což znamená, že tato funkce a její první derivace má konečný počet bodů nespojitosti a konečné jednostranné limity. Derivační vzorce jsou následující. [1]

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} F_k \exp\left(j \frac{2\pi}{T} kt\right) \quad (5)$$

$$F_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \exp\left(-j \frac{2\pi}{T} kt\right) dt, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6)$$

Kde F_k , $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ jsou koeficienty Fourierovy řady. Součet Fourierovy řady je v bodech nespojitosti roven aritmetickému průměru jednostranných limit. Fourierovu řadu s harmonickými funkcemi v exponenciálním tvaru lze převést na řadu, která obsahuje funkce sinus a kosinus. Fourierova řada tedy představuje rozklad signálu na nekonečný počet dvojic vektorů, které rotují proti sobě.

$$x(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} (a_{+k}(t) + a_{-k}(t)). \quad (7)$$

K definici Fourierovy řady je třeba dodat, že signál $x(t)$ nemusí být jen reálná funkce času, ale také komplexní funkce času, která je vhodná pro záznam orbitů.

3.4.2 Fourierova transformace obecného signálu

Rozklad na Fourierovu řadu se týká jen periodických signálů. Přestože počet složek rozkladu je obecně nekonečný, obsahuje tento rozklad jen složky s frekvencemi, které jsou násobky, tzv. harmonické, základní frekvence opakování signálu. To znamená, že spektrum osahuje jen izolované složky.

Rozklad obecného, tj. nejen periodického signálu, ale také neperiodického signálu na harmonické složky, lze vypočítat s pomocí Fourierovy transformace. Příkladem neperiodického signálu je osamocený obdélníkový impuls nebo také jakákoliv jiná neperiodická funkce. Tento rozklad je obsahuje obecně složky o všech frekvencích s infinitesimální (nekonečně malou) amplitudou. Spektrum je spojitá funkce frekvence. Definiční vzorce přímé a zpětné (inverzní) Fourierovy transformace pro signál, tj. funkcí $x(t)$ ve významu vzoru nebo originálu, jsou následující:

$$X(\omega) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j\omega t) dt \quad \omega \in (-\infty, +\infty) \quad (8)$$

$$x(t) = F^{-1}\{X(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad t \in (-\infty, +\infty) \quad (9)$$

Kde funkce úhlové frekvence $X(\omega)$ má význam obrazu nebo také obecně signálu, který je transformován do frekvenční oblasti. Pro existenci obrazu podle vzorce přímé transformace se matematicky klade na časovou funkci podmínka absolutní integrovatelnosti funkce a dále podmínka, aby $x(t)$ byla po částech spojitá s konečným počtem bodů nespojitosti. Absolutní integrovatelnost znamená existenci integrálu

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt \quad (10)$$

V matematické terminologii patří Fourierova transformace mezi integrální transformace s jádrem, které je harmonickou funkcí času nebo úhlové frekvence.

Transformační vzorce Fourierovy transformace jsou lineární, a proto lineární kombinace dílčích originálů má obraz složený ze shodné lineární kombinace dílčích obrazů. [1]

3.4.3 Rychlá a diskrétní Fourierova transformace

Diskrétní Fourierova transformace (DFT) je poměrně náročná matematická operace. Její výpočet z definice má náročnost $O(N^2)$, kde N je počet prvků posloupnosti. Při zpracování fotografických snímků však N dosahuje řádu milionů a takto pomalý výpočet by byl již nepřijatelný. Tento fakt vedl k hledání efektivnějších postupů a již v roce 1965 publikovali J. W. Cooley a J. W. Tukey práci, ve které popsali algoritmus tzv. rychlé Fourierovy transformace (Fast Fourier Transform).

Původní algoritmus FFT byl vypracován pro $N=2^m$, m je celé kladné číslo, nicméně později byly vypracovány další, modifikované verze pro obecnější případy.

a) Metody vybraných vstupních posloupností

Této metodě se také říká algoritmus „decimování v čase (DIT)“. Posloupnost x_j mající N členů převedeme na součet sudé a liché posloupnosti, každé o délce $N/2$. Obraz X_k pak můžeme rozepsat na součet

$$X_k = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{sudé}(n) \cdot e^{-j2\pi n \frac{k}{N}} + e^{-j2\pi \frac{k}{N}} \cdot \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{liché}(n) \cdot e^{-j2\pi n \frac{k}{N}} \quad (11)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

Dále zavedeme značení pro oba obrazy posloupností sudých a lichých členů:

$$X_{k \frac{N}{2}}(x_{sudé}(n)) = G_k \quad (12)$$

$$X_{k \frac{N}{2}}(x_{liché}(n)) = H_k \quad k = \left\langle 0, \frac{N}{2} - 1 \right\rangle \quad (13)$$

Posloupnosti H_k a G_k jsou opět periodické, a obraz původní posloupnosti tedy můžeme zapsat ve tvaru

$$X_k = G_k + e^{-j2\pi \frac{k}{N}} \cdot H_k \quad k = \left\langle 0, N-1 \right\rangle \quad (14)$$

Nebo jako dva vztahy

$$X_k = G_k + A^k \cdot H_k \quad (15)$$

$$X_{k+\frac{N}{2}} = G_k - A^k \cdot H_k \quad A^k = e^{-j2\pi \frac{k}{N}} \quad k = \left\langle 0, \frac{N}{2} - 1 \right\rangle \quad (16)$$

Transformaci jsme tak rozložili na dvě transformace poloviční délky. Takto lze pokračovat rekurzivně, až se dostaneme k N transformacím délky 1, přičemž tento rozklad má zřejmě časovou složitost $O(\log_2 N)$. Celkem tedy algoritmus rychlé Fourierovy transformace má pro posloupnost délky N složitost $O(N \log_2 N)$, což je oproti původní kvadratické složitosti významný pokrok (pro N rovné jednomu miliónu činí rozdíl v délce výpočtu 4 řády).

b) Metoda vybraných obrazových posloupností

Této metodě se rovněž říká algoritmus „decimování ve frekvenci (DIF)“. Na rozdíl od předchozí budeme vybírat sudé a liché členy obrazové posloupnosti X_k . Pro sudé členy platí

$$\begin{aligned} X_k &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j2\pi \frac{2i}{N}} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j2\pi \frac{i}{N}} = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(n) \cdot e^{-j2\pi \frac{i}{N}} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(n + \frac{N}{2}) \cdot e^{-j2\pi \frac{i}{N}} = \\ &= X_k \{x(n) + x(n + \frac{N}{2})\} \\ i &= \left\langle 0, \frac{N}{2} - 1 \right\rangle, k = 2 \cdot i \end{aligned} \quad (17)$$

Analogicky pro liché členy

$$X_{k+1} = X_{k \frac{N}{2}} \left\{ \left(x(n) - x(n - \frac{N}{2}) \right) \cdot e^{-j2\pi \frac{n}{N}} \right\} \quad (18)$$

Zavedeme-li pomocné posloupnosti r_n a s_n

$$x(n) + x(n + \frac{N}{2}) = r_n \quad (19)$$

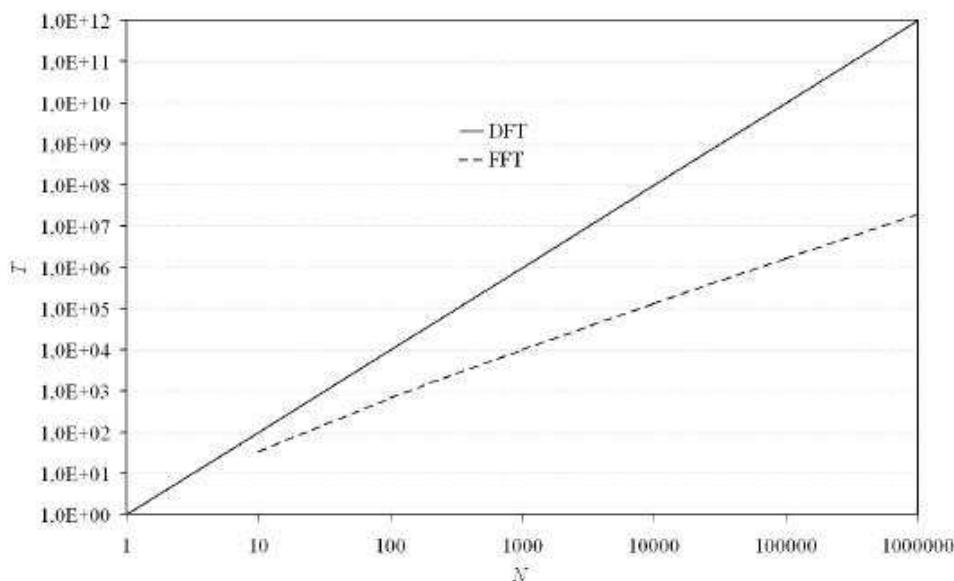
$$\left(x(n) - x(n - \frac{N}{2}) \right) \cdot A^n = s_n \quad A^n = e^{-j2\pi \frac{n}{N}}, n = \left\langle 0, \frac{N}{2} - 1 \right\rangle \quad (20)$$

Pak můžeme obrazy vybraných posloupností vyjádřit vztahy

$$X_k = X_{k \frac{N}{2}} \{r_n\} \quad (21)$$

$$X_{k+1} = X_{k \frac{N}{2}} \{s_n\} \quad (22)$$

Tento postup je tedy analogický předchozí metodě. Výpočet transformace posloupnosti délky N se převádí na stejný problém pro dvě posloupnosti poloviční délky, takže jeho celková složitost je při rekurzivním rozkladu opět $O(N \log_2 N)$. [7]



Obr. 9: Závislost výpočetního času T na množství dat N

Frekvenční analýza při správném použití odstraňuje nedostatky analýzy v časové oblasti a je metodou umožňující lokalizovat vznikající poruchy jednotlivých částí sledovaného stroje (objektu). Úplnou frekvenční analýzou se získá amplitudové a fázové spektrum signálu. Základem frekvenční analýzy jsou především diskrétní Fourierova transformace (*Discrete Fourier Transform* – DFT) a rychlá Fourierova transformace (*Fast Fourier Transform* – FFT). Signál $X(t)$ proměnný v čase je získáván měřením (např. zrychlení kmitavého pohybu) a dále zpracováván numericky. Signál je v časové oblasti v analogově-číslicovém převodníku vzorkován, tj. jsou určeny jeho hodnoty v okamžicích vzdálených o obvykle pravidelnou periodu vzorkování T_{vz} (při vzorkovací frekvenci f_{vz}). Protože v praxi je k dispozici jen konečný počet N naměřených vzorků signálu, je nutné použít diskrétní Fourierovu transformaci. Její podstata spočívá v tom, že signál je v časovém úseku od $-T/2$ do $+T/2$, když $T = NT_{vz}$ a $N = 2^k$ (k je přirozené číslo) rozložen na soustavu periodických funkcí s periodou od nuly do T . [12]

Veškerá teorie a matematický aparát FFT i DFT jsou relativně složitou záležitostí, která rozsahově několikanásobně přesahuje možnosti této práce, takže v tomto je doporučeno obrátit se na odbornou literaturu. V této práci jsou připomenuty pouze základní parametry Fourierovy transformace, které budou v příštích úvahách představovat i potenciální zdroje nejistoty výsledné diagnózy. Jsou to:

- frekvenční rozsah, což je základní pásmo od 0 Hz do $f_{vz}/2$, které je nezávislé na počtu vzorků N (skutečný rozsah je v praxi menší vlivem filtrů),
- „zoom“ faktor, který při použití frekvenční lupy udává, kolikrát je frekvenční rozsah menší,
- počet spektrálních čar je obvykle $N/2$ (neplatí pro tzv. nedestruktivní zoom),
- pořadové číslo spektrální čáry, které odpovídá číslu časového odměru,
- rozlišitelnost frekvenční analýzy, udávající rozestup mezi spektrálními čarami r daný vztahy:

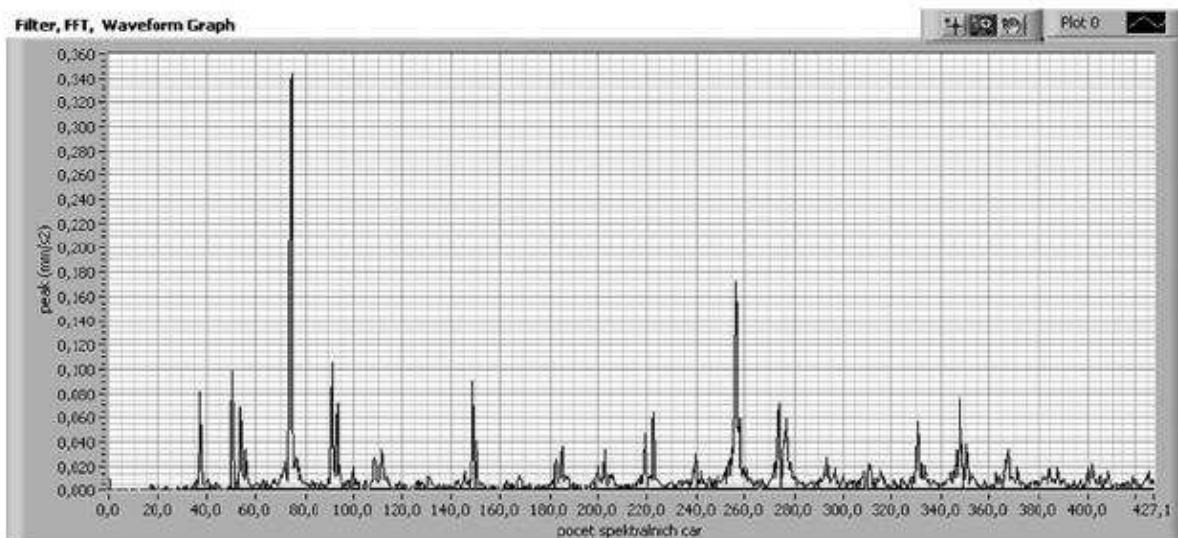
$$r = \frac{1}{T} = \frac{1}{NT_{vz}} = \frac{f_z}{N} \quad (23)$$

3.4.4 Rozbor závad rotačního systému podle kmitočtového spektra

K posouzení skutečného stavu strojů a identifikaci a lokalizaci jejich poškození či vznikajících poruch je nutné provést rozbor výsledků frekvenční analýzy. Při jejím použití se nejen získají informace o oblasti skutečných otáčkových frekvencí, podobně jako u analýzy v oblasti časové, ale frekvenční analýza informuje i o problémech především na násobcích otáčkové frekvence – vyšších harmonických. Rozbor je zpravidla možné rozdělit do tří hlavních oblastí, kterými jsou:

- pásmo nízkých frekvencí, sahající od frekvencí pod nejpomalejší rychlostí otáčení hřídelí až po frekvence nižších násobků (čtvrtou až šestou harmonickou) hřídelí s největšími otáčkami: získají se informace o závadách způsobených nevyvážeností, ohybem hřídelí, přesazením hřídelí, nestabilitou radiálních ložisek a uvolněním mechanických vazeb
- pásmo středních frekvencí, nacházející se nad oblastí nízkých frekvencí až po frekvence od asi 1 po 5 kHz (podle otáček a typu převodů): obsahuje informace o závadách ozubených převodů a převodovek
- pásma vysokých frekvencí od horní hranice pásma středních frekvencí nahoru: obsahují informace o počínajících závadách valivých ložisek (např. poškození kroužků, trhlínky apod. se projevují úzkými a ostrými impulzy v oblasti vysokých kmitočtů a odpovídající složky signálu zde nejsou překryty intenzivnějšími vlivy převládajícími na nízkých a středních frekvencích)

Pro ilustraci je na obr.10 ukázáno frekvenční spektrum vibrací získané při měření na stroji s uvolněným základem s typickou výraznou druhou harmonickou. [12]



Obr. 10: Frekvenční spektrum vibrací stroje s uvolněným základem: otáčková frekvence 38 Hz (asi 2300 min⁻¹) a výrazná druhá harmonická 76 Hz

4 Monitorování stavu strojů s využitím vibračních signálů

Je prokázáno, že údržba je jednou z nejvyšších nákladových položek, jestli ne vůbec nejvyšší. Monitorováním stavu strojů lze předcházet haváriím a neplánovaným odstávkám. V závislosti na aktuálním stavu stroje lze naplánovat termín jeho opravy na vhodnou dobu, kde se náklady minimalizují.

Jelikož většina závad rotačních strojů se projevuje nadměrnými vibracemi, využíváme vibrační signály jako indikátory mechanického stavu strojů. [8]

4.1 Základní pojmy

Mechanické kmitání - dynamický jev, při němž hmotné body nebo tuhá tělesa vykonávají vratný pohyb kolem klidové rovnovážné polohy, kmitání je způsobeno externí nebo interní budící silou. Termín kmitání je ekvivalentní pojmu vibrace.

Vibrace – lze popsat amplitudu a fázi v daném časovém okamžiku. Hodnoty veličin mechanických vibrací (tabulka) jsou dány budící silou, jejím směrem a kmitočtem. Dle časových změn veličin mají vibrace charakter jevu periodického, neperiodického nebo náhodného. Harmonické vibrace jsou periodické vibrace obsahující jedinou frekvenci (23). Superpozicí různých časových průběhů vzniknou složené vibrace (24) a mohou být jak periodické tak neperiodické.

$$x = x_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (23)$$

$$x = x_{01} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \dots + x_{0n} \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (24)$$

Vlna – změna vlastností nebo fyzikálního stavu prostředí šířící se v tomto prostředí a přenášející energii, aniž by současně docházelo k přemísťování prostředí. Stojatá vlna vzniká pokud se vlivem odrazu šíří proti sobě dvě totožné vlny stejnou fázovou rychlostí.

Rázy – při střetu dvou navzájem se pohybujících těles (např. kulička v ložisku) dojde k náhlé změně gradientu určující veličiny vibrací (většinou rychlosti nebo zrychlení). Ráz způsobí přechodový kmitavý jev generující v tělese postupnou rázovou vlnu. V technické diagnostice se také používá uměle generovaný ráz např. diagnostickým kladívkem se zabudovaným senzorem síly.

Značka	Jednotka	Název, vysvětlení a vztahy
s	m	okamžitá výchylka vibrací, tj. změna polohy bodu (tělesa) k referenční soustavě souřadnic (displacement)
s_0	m	amplituda vibrací, tj. maximální hodnota harmonických vibrací (amplitude)
s_v	m	výkmit, tj. maximální hodnota vibrací v daném časovém intervalu (peak- s_p)
s_r	m	rozkmit, tj. maximální rozdíl výkmitů v daném časovém intervalu (peak to peak - s_{pp})
φ	rad, °	fáze harmonické veličiny v čase $t = 0$ (phase angle)
v	m.s^{-1}	rychlost vibrací $v = ds/dt$ (velocity), pro harmonické kmitání platí $v_0 = \omega s_0$ složené periodické vibrace lze po rozkladu na jednotlivé harmonické složky definovat jako efektivní hodnotu rychlosti dle vztahu $v_{ef} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n v_{0i}^2$
U	m.s^{-1}	mohutnost kmitání, tj. maximální efektivní hodnota rychlosti vibrací (v daném časovém intervalu) na vybraných místech (severiny)
a	m.s^{-2}	zrychlení vibrací $a = dv/dt$ (acceleration), pro harmonické vibrace měřeného objektu platí: $a_0 = \omega \cdot v_0 = \omega^2 s_0 \quad a_{ef} = \omega \cdot v_{ef}$
b	m.s^{-3}	ryv, tj. veličina udávající časovou změnu zrychlení da/dt (jerk)
\bar{x}		Střední hodnota určující veličiny (mean value): $\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad \hat{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t) $ $x(t)$ je určující veličina vibrací (většinou rychlost nebo zrychlení), T je daný časový interval pro $x(t)$, $x_i(t)$ jsou diskrétní hodnoty veličiny, n je celkový počet hodnot, (platí jak pro periodické, neperiodické tak i náhodné vibrace)
x_{ef}		efektivní hodnota určující veličiny (RMS- root mean square): $x_{ef}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad \hat{x}_{ef}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2(t)$ $x(t)$ je určující veličina vibrací (většinou rychlost nebo zrychlení), T je daný časový interval pro $x(t)$, $x_i(t)$ jsou diskrétní hodnoty veličiny, n je celkový počet hodnot, (platí jak pro periodické, neperiodické tak i náhodné vibrace)
L	dB	hladina určující veličiny vibrací: $L = 20 \log \frac{H}{H_0}$ kde H_0 je referenční hodnota určující veličiny: pro amplitudu $s_0 = 10^{-12} \text{ m}$ pro rychlost $v_0 = 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ pro zrychlení $a_0 = 10^{-5} \text{ m.s}^{-2}$

Tab.1 : Přehled vybraných veličin a vztahů mechanických veličin [9]

Nejvhodnější veličinou ve vibrodiagnostice je efektivní hodnota rychlosti, neboť je přímým měřítkem škodlivosti vibrací z hlediska přenosu energie. Harmonické vibrace představují přeměnu potenciální energie na kinetickou a naopak. Průměrná potenciální energie a průměrná kinetická energie jsou stejné a jsou rovné polovině celkové energii, tj.

$$E = mv_{ef}^2 \cdot [9] \quad (25)$$

Při diagnostikování strojů je nutné rozlišovat absolutní a relativní vibrace:

- absolutní vibrace – pohyb je vztahován ke gravitačnímu poli zeměkoule neboli k pevnému, ale fixnímu bodu. Měří se pomocí absolutních senzorů vibrací.
- relativní vibrace – pohyb tělesa je vztahován ke zvolenému reálnému bodu (např. jiná část stroje, základová deska stroje, náprava vozidla apod.), tj. bodu, který může být také v pohybu. Měření se pomocí relativních senzorů vibrací.

Umístění snímačů

Snímač by neměl být umístěn na lakované povrchy, nezátížené zóny ložisek, dělicí roviny a konstrukční mezery. Měl by být zajištěn dostatečný přítlak snímače s kolmým úhlem k povrchu. Vibrace by měly být měřeny ve všech třech směrech:

- Axiálním (podélném) – v tomto směru by měření celkových vibrací měla vykazovat velmi nízké hodnoty, jelikož většina sil je generována kolmo k hřídeli, nicméně problémy s nesouosostí a ohnutým hřídelem způsobí vibrace i v tomto směru.

NDA – Non Drive Axial – nehnací konec hřídele axiálně

DEA – Drive End Axial – hnací konec hřídele axiálně

- Horizontálním – měření celkových vibrací v tomto směru vykazuje obvykle největší hodnoty, stroj je v této rovině poddajnější, nadměrné vibrace působící v horizontálním rovině jsou dobrým indikátorem nevyváženosti.

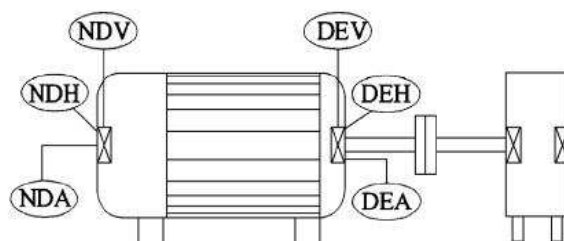
NDH – Non Drive Horizontal – nehnací konec hřídele horizontálně

DEH – Drive End Horizontal – hnací konec hřídele horizontálně

- Vertikálním – v tomto směru obvykle měření vykazují menší celkové vibrace než při měření v horizontální rovině, je to způsobeno tuhostí stroje, která je způsobena konstrukcí a působením gravitace.

NDV – Non Drive Vertical – nehnací konec hřídele vertikálně

DEV – Drive End vertical – hnací konec hřídele vertikálně



Obr. 11: Umístění snímačů vibrací na měřeném stroji [8]

Celkové vibrace stroje

Celkové vibrace stroje představují celkovou vibrační energii měřenou v jistém frekvenčním rozsahu. Měřením celkových vibrací stroje nebo jeho částí a porovnáním této hodnoty s její normální úrovní (normou) získanou např. při měření na novém stroji nebo na stroji po generální opravě dostaneme informaci o stavu stroje. Tato informace se pak srovnává s nastavenými poplachovými úrovněmi a vyhodnocuje se její časový vývoj (trend). Porovnáme-li celkové hodnoty, musí být zachován stejný frekvenční rozsah a stejný způsob měření amplitudy signálu.

Mohutnost vibrací RMS	Meze rychlosti a třídy strojů ISO 2372 - 1974			
mm/s	Malé stroje	Střední stroje	Velké stroje	
	Třída I	Třída II	Tuhé uložení	Poddajné
			Třída III	Třída IV
0,28	dobrý	dobrý	dobrý	dobrý
0,45				
0,71	uspokojivý	uspokojivý	uspokojivý	uspokojivý
1,12				
1,80	neuspokojivý	neuspokojivý	neuspokojivý	neuspokojivý
2,80				
4,50	nepříjemný	nepříjemný	nepříjemný	nepříjemný
7,10				
11,20				
19				
28				
45				
71				

Tab. 2: Orientační meze vibrací stroje

Frekvenční analýza vibrodiagnostických signálů

Frekvenční analýza odstraňuje nevýhody analýzy v časové oblasti, tj. lokalizuje vznikající poruchy jednotlivých částí objektu (nevyváženost, ozubené soukolí, ložiska aj.). Úplná

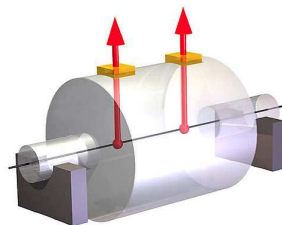
frekvenční analýza je dána amplitudovým spektrem a fázovým spektrem. U náhodných signálů se vyhodnocuje výkonová spektrální hustota. Fázové spektrum umožňuje analyzovat fázové poměry mezi jednotlivými komponentami amplitudového spektra a je používané pro detekci nevyváženosti rotačních částí stroje, nesouososti hřídelů a pro vyvažování. Matematické vyjádření spektrální analýzy je popsáno v literatuře [1], [8], [9].

4.2 Oblast nízkých kmitočtů

Nevyváženost

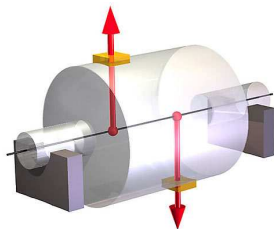
K nevyváženosti dochází, když hlavní osa setrvačnosti hřídele není totožná s její geometrickou osou. Existují tři druhy nevyváženosti:

Statická nevyváženost – osa rotace je rovnoběžná s osou setrvačnosti



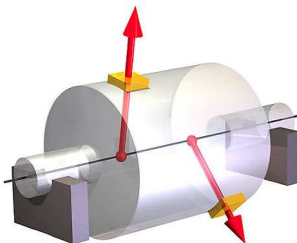
Obr. 12: Statická nevyváženost

Momentová nevyváženost – dvě totožné síly (hmoty) působí proti sobě (posunutě o 180°)



Obr. 13: Momentová nevyváženost

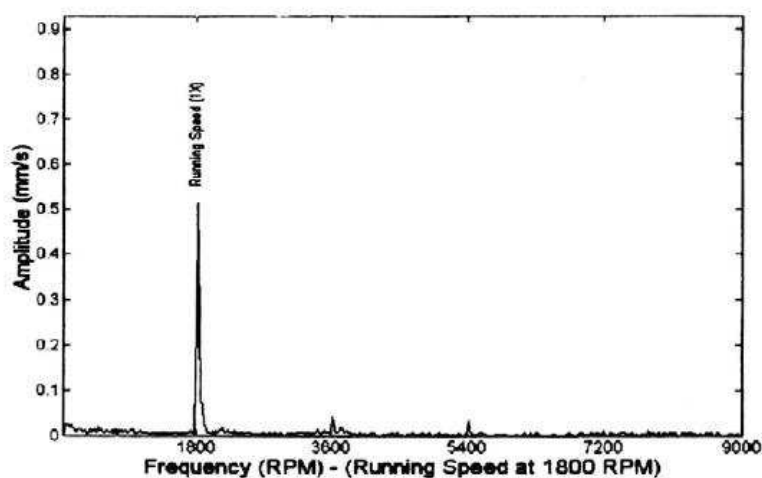
Dynamická nevyváženost – kombinace statické a momentové nevyváženosti



Obr. 14: Dynamická nevyváženost

Ve většině případů se v praxi vyskytuje dynamická nevyváženost. U jednoduchých strojů převládá statická nevyváženost nad momentovou. U složitějších strojů s více než jednou spojkou nebo s několika místy na rotoru, kde se může nevyváženost vyskytnout, bývá dominantní momentová nevyváženost.

Nevyváženost obvykle způsobuje větší dynamické zatížení ložisek, než připouští konstrukční návrh. Následkem únavy materiálu pak vznikají závady ložisek. Únava materiálu je výsledkem působení sil na zatěžované plochy a projevuje se jako drobení či odlupování kovového povrchu. U vibrací způsobených čistou nevyvážeností má jejich průběh sinusový tvar s jednou vlnou za otáčky. Ve spektru se to projevuje vyšší hodnotou amplitudy při otáčkové frekvenci (obr. 15). Ostatní závady mohou rovněž způsobovat vyšší hodnotu amplitudy při otáčkové frekvenci, ale obvykle způsobují i harmonické násobky. Obecně platí, pokud má signál harmonické násobky nad základní otáčkovou frekvencí, pak problém není zaviněn nevyvážeností. Ke vzniku harmonických násobků může však dojít tehdy, když se nevyváženost bude zvětšovat anebo když se tuhost podpory v horizontálním a vertikálním směru bude velmi lišit. [8]



Obr. 15: Spektrum FFT indikující nevyváženost [10]

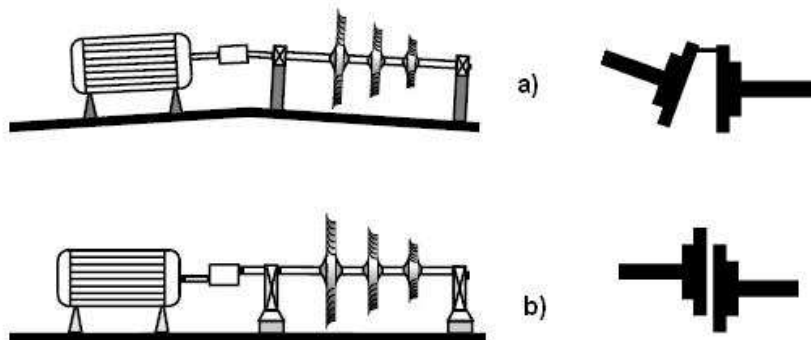
Analýza fáze

- posunutí fáze o 90° mezi vertikálním a horizontálním směrem
- v případě převládající statické nevyváženosti, není ve stejném měřicím směru na obou koncích stroje či z obou stran spojky naměřen žádný fázový posun

Nesouosost

O nesouososti mluvíme tehdy, když hřídele, spojky a ložiska nejsou vyrovnány do osy. Existují dva typy nesouososti (obr. 16):

- úhlová – dva hřídele jsou spojeny ve spojce tak, že v hřídeli vzniká ohybová síla
- paralelní – osy hřídelů jsou rovnoběžné, ale vůči sobě posunuté
- nebo jejich kombinace



Obr. 16: Nesouosost a) úhlová, b) paralelní

Příčiny:

- tepelná dilatace – většina strojů je vyrovnána do osy za studena, když je pak stroj provozován a teplota stoupá, způsobí tato tepelná dilatace vznik nesouososti.
- stroje, které jsou pevně spojené a nejsou správně vyrovnané
- síly přenášené na stroj potrubím a podporami
- nerovné, posouvající se nebo sedající základy

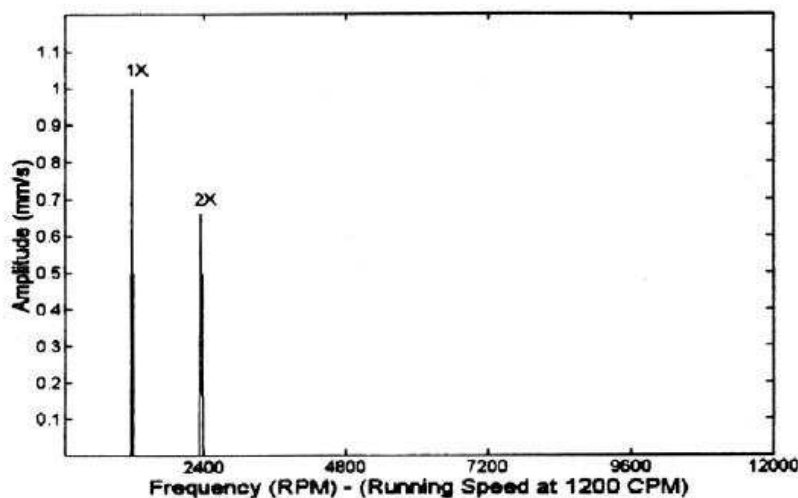
Následky:

Stejně jako u nevyváženosti – poškození ložisek, dále pak zvýšení vibrací stroje, opotřebení těsnících elementů, nadměrné opotřebení spojek, vyšší spotřeba energie.

- úhlová nesouosost způsobuje axiální vibrace při otáčkové frekvenci (1x)
- paralelní nesouosost vyvolává vibrace při dvojnásobku otáčkové frekvence (2x)

Jelikož většina případů nesouososti je kombinací úhlové a paralelní nesouososti je třeba ve spektrech analyzovat jak základní otáčkovou frekvenci, tak její dvojnásobek, a to v axiálním i radiálním směru. [8]

- pokud jsou u spojky hodnoty amplitudy dvojnásobné otáčkové frekvence pod úrovní 50% amplitudy při základní otáčkové frekvenci, jsou tyto hodnoty přijatelné a zařízení lze obvykle provozovat po dlouhou dobu.
- je-li hodnota amplitudy dvojnásobné otáčkové frekvence v rozmezí 50-150% amplitudy při základní otáčkové frekvenci, pak se jedná o výraznou nesouosost a potřebný zásah je třeba provést co nejdříve.



Obr. 17: Spektrum FFT indikující nesouosost [10]

Analýza fáze

Velice užitečným nástrojem sloužícím k analýze nesouososti je měření fáze. Je-li to možné, zjistíme fázový posun mezi hodnotami naměřenými na protějších koncích stroje v axiálním směru.

- úhlová nesouosost – v axiálním směru z obou stran spojky nebo stroje existuje fázový posun 180°
- paralelní nesouosost – v radiálním směru z obou stran spojky nebo stroje existuje fázový posun 180° . K fázovému posunu o 180° dojde, přemístíme-li snímač na tomtéž ložisku z horizontální do vertikální polohy
- kombinace obou – v axiální i radiální poloze bude z obou stran spojky nebo stroje existovat posun o 180°

Mechanické uvolnění

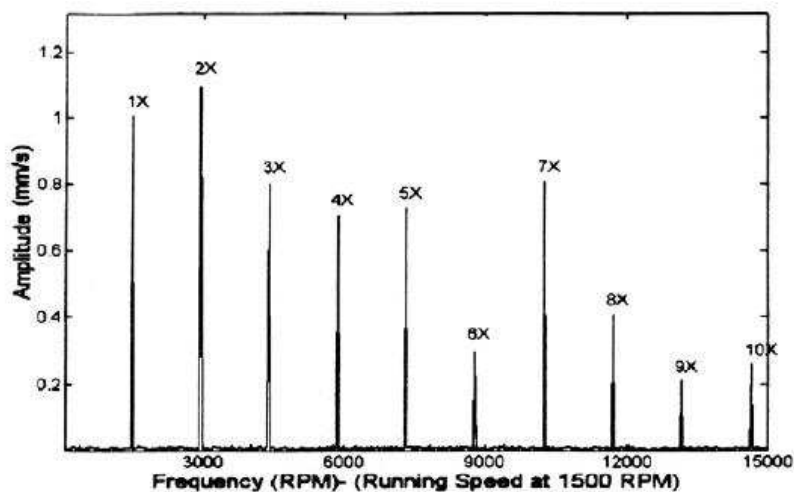
Mechanické uvolnění nebo nesprávné uložení/lícování jednotlivých částí se obecně projevuje jako dlouhý sled neobvykle vysokých amplitud při harmonických násobcích otáčkové frekvence nebo harmonických násobcích poloviny otáčkové frekvence. Tyto harmonické se mohou objevovat sporadicky (ne všechny), například se mohou objevovat špičky při $2x f_{hříd}$, $3x f_{hříd}$, $4x f_{hříd}$, $5x f_{hříd}$, $6x f_{hříd}$ atd. nebo při $3,5x f_{hříd}$, $4x f_{hříd}$, $5,5x f_{hříd}$, $6x f_{hříd}$ atd. [8]

Příčiny

- došlo k mechanickému olovnění stroje od základu (stojanu)
- došlo k uvolnění komponenty stroje
- došlo k rozvoji defektu ložiska, což způsobilo opotřebení jeho elementů nebo olovnění ložiska

Následky

- pokud olovnění souvisí s ložiskem, pak jsou jeho účinky stejné jako při nevyváženosti, ale silnější
- pokud dojde k uvolnění jiné části (např. lopatky ventilátoru), potom existuje nebezpečí, že se tato část odlomí a způsobí sekundární závadu



Obr. 18: Spektrum FFT indikující uvolnění [10]

Ohnutý hřídel

Při měření celkových vibrací a spektrální analýzy se ohnutý hřídel projevuje identicky jako nesouosost. K jejich rozlišení je zapotřebí provést měření fáze.

Příčiny ohnutí:

- ohnutí za studena – u hřídelů s velkým poměrem délky a průměru může v klidové poloze působením gravitace dojít k prohnutí
- nesprávná manipulace
- vysoký kroutící moment

Následky

- nadměrné dynamické zatěžování ložisek

Analýza fáze:

- hodnoty fáze v radiálním směru (vertikálně a horizontálně) jsou obvykle „ve fázi“
- hodnota fáze v axiálním (podélném) směru je obvykle o 180° posunutá

4.3 Oblast středních kmitočtů

Vady převodů

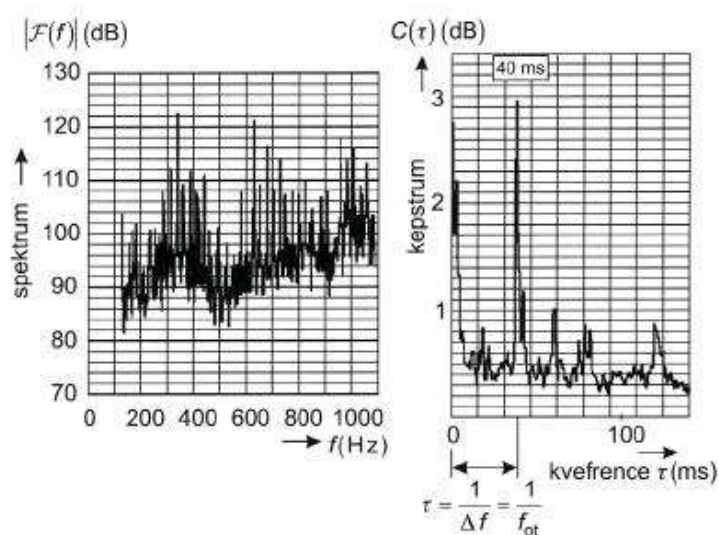
Základem analýzy převodů s čelními ozubenými koly jsou zubové frekvence f_z , které vznikají při záběru dvou nebo více ozubených kol a závisí na počtu zubů a rychlosti otáčení jednotlivých kol. Pro jednoduchou převodovku platí:

$$f_z = f_1 \cdot n_1 = f_2 \cdot n_2 \quad (26)$$

Vady převodu a jejich projevy:

- opotřebení vlivem skluzu zubů při záběru – narůstá druhá a třetí spektrální složky, rozšiřují se boční pásma a vznikají rezonanční složky spektra při frekvenci f_n
- nesouosost hřídelů u převodovky – nárůst složky na dvojnásobek zubového kmitočtu a různá výška levých a pravých složek bočního pásma
- uvolněné kolo na hřídeli – osciluje vůči hřídeli v podélném pohybu a složky druhé harmonické zubového kmitočtu je větší než složka první a třetí harmonické

- excentricita – nárůst složky zubové frekvence
- boční zubová vůle – nárůst všech složek spektra a změna odstupu v bočních pásmech
- vyštípnutí nebo odlomení části zubu – při této závadě je nejvhodnější pro analýzu časový průběh signálu nebo keprální analýza, protože je závada ve spektru maskována ostatními složkami spektra (obr. 19) [8]



Obr. 19: Frekvenční a keprální analýza vadného převodového soukolí

4.4 Oblast vysokých kmitočtů

Vady ložisek

Existuje mnoho závad strojů, které mohou způsobit poškození ložisek. Nejčastěji se jedná o nadměrné zatížení způsobené nesouosostí, nevyvážeností nebo problémy s mazáním (nedostatečné mazání, nesprávné mazání, nadměrné mazání nebo znečištění maziva) nebo jejich kombinace. K ostatní patří:

- vada dosedací plochy pro ložiska na hřídelích nebo v pouzdrech
- nesprávné uložení (tolerance) v pouzdrech a na hřídelích
- vibrace v době, kdy se ložisko neotáčí
- průchod elektrického proudu ložiskem

Často má počáteční únava ložiska za následek vznik smykového napětí, které působí cyklicky pod zatěženým povrchem. Následkem působení tohoto napětí vznikají trhlinky, které se postupně rozšiřují směrem k povrchu. Průchodem valivých částí přes tyto trhliny dochází k uvolňování (odlamování) drobných částic. Tento jev je známý jako drolení nebo odlupování. Drolení se postupně rozšiřuje a může případně způsobit to, že se ložisko stane nepoužitelné. Tento druh defektu má dlouhotrvající charakter a jeho přítomnost se projevuje zvýšenými vibracemi a hlukem.

Další typ poškození ložiska je vyvolána přetížením povrchu. To způsobuje vznik trhlin na povrchu, které se rozšiřují dovnitř materiálu. Dochází k němu následkem nadměrného dynamického zatížení či nesprávným mazáním.

V obou případech generuje poškozené ložisko hluk a vibrace, které pokud jsou detekovány, dovolují uživateli včas odstranit příčinu závady ložiska nebo vyměnit ložisko dříve, než dojde k jeho úplnému zničení.

Defekt ložiska lze rozdělit do několika fází dle jeho vývoje:

- počáteční fáze: defekt je stále pod povrchem nebo natolik malý (mikrometry), že nevzniká měřitelný vibrační signál. Nárazy při kontaktu kov-kov se tělesem ložiska šíří akustická emise ve frekvencích až do několika MHz, čímž je možnost detekovat závadu v nejranějším stádiu. Používá se například metoda SEE (Spectral emitted energy) patent firmy SKF, nebo analýzou impulsního akustického signálu.
- druhá fáze: již dochází k poškození jednotlivých elementů, ale vibrační spektrální složky odpovídajícím nízkým kinematickým frekvencím ložiska jsou zcela maskovány nízkofrekvenčními spektrálními složkami od ostatních částí stroje. Zde se diagnostika provádí ve frekvenčním ultrazvukovém pásmu v rozmezí 20kHz – 60kHz za použití akcelerometrů s vysokou hodnotou vlastní rezonanční frekvence. Zpracování signálu umožňuje řada způsobů, většinou patentovaných u různých firem.
- třetí fáze: poškozený prvek vyvolává při pohybu stykem s dalším prvkem mechanické rázy, při nichž dochází k přenosu kinetické energie na těleso ložiska. Toto těleso se po

rázu rozkmitá na vlastním kmitočtu v rozmezí 5kHz – 20kHz, přičemž kmity jsou tlumené a rychle doznívají. Zde je vhodná obálková analýza.

- čtvrtá fáze: ložisko je již v koncovém stádiu své životnosti a lze již detekovat vibrační spektrální složky přímo v oblasti nízkých kmitočtů. Dochází ale i k nárůstu otáčkových spektrálních složek a široká oblast spektra má náhodný charakter. Tato měření obvykle indikují bezprostředně hrozící defekt ložiska, kdy zbývá méně než 10% doby životnosti.

5 Statistická analýza

V rámci této práce byla využita analýza rozptylu pro svou schopnost posoudit souvislost mezi kvantitativní proměnnou a jednou či více kvalitativními proměnnými. V těchto případech hraje analýza rozptylu nezastupitelnou úlohu, je to jediný statistický postup, kterým lze ohodnotit vztah dvou veličin co do relace příčina – následek, přičemž veličina příčina nemusí obsahovat číselné hodnoty.

Postup testování hypotéz nejprve stanoví nulovou a alternativní hypotézu. Následně se statistik snaží v naměřených datech najít dostatek důkazů, jež by ho opravňovaly nulovou hypotézu zamítnout. Předpokládá se tedy vždy platnost nulové hypotézy a posuzuje se oprávnění k jejímu zamítnutí. Při tom existuje riziko chybného úsudku. Hovoříme o chybě prvního a druhého druhu. Chybu prvního druhu volíme sami před začátkem testování, říkáme jí signifikační úroveň či hladina významnosti. Obvykle se volí 5%. Pokud máme velké množství naměřených dat, můžeme spoléhat na platnost „Central Limit Theorem“ a můžeme si dovolit nastavit signifikační úroveň nižší. Chyba prvního druhu představuje pravděpodobnost, že nulová hypotéza platí, ale my ji omylem zamítneme, je to riziko, které jsme ochotni podstoupit. Chyba druhého druhu pak odpovídá pravděpodobnosti, že nulová hypotéza neplatí, ale my ji omylem přijmeme. Je závislá na počtu měření a na velikosti zvolené signifikační úrovně pro chybu prvního druhu.

Je nutno použít analýzu rozptylu. Ta netestuje rozdíly mezi jednotlivými dvojicemi souborů. Nulová hypotéza předpokládá rovnost všech souborů (rovnost jejich průměrů) a posuzuje se, zda existuje dostatek důkazů k tomu, že alespoň jeden soubor je odlišný. Tím se vše odbude jediným testem a statistik je schopen garantovat zvolené riziko odhadu (tedy zvolenou spolehlivost). Až následně se porovnávají rozdíly mezi jednotlivými soubory. Jelikož je toto porovnávání sporné co do zachování zvolené spolehlivosti, existuje celá řada metod, mezi kterými můžeme volit. [14]

V práci jsem použil proceduru **One-Way ANOVA**. Podrobný popis jednorozměrné analýzy rozptylu lze najít v běžně dostupné statistické literatuře. V rámci této práce nelze proceduru podrobněji popisovat kvůli její obsáhlosti a odbornosti. Další pojmy vysvětlují hodnoty uváděné v tabulkách analýz pro jednotlivá měření.

Nejčastěji se užívají charakteristiky variability založené na součtu druhých mocnín (tzv. čtverců) –**SS**– odchylek od průměru. Charakteristika

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (27)$$

se nazývá **rozptyl**, anglicky variance. Vidíme, že s^2 je vždy větší nebo rovno nule. Nule je rovno jen v případě, kdy všechny x_i jsou konstantní, tedy $x_i = \text{pro všechna } i = 1, 2, \dots, n$.

Nejužívanější charakteristika variability je odmocnina z rozptylu, tedy

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (28)$$

která má název **směrodatná odchylka** (anglicky standard deviation). Výhodou oproti rozptylu je to, že má stejný rozměr (je ve stejných měrných jednotkách) jako naměřené hodnoty x_i a jejich průměr. Zhruba řečeno vypovídá o tom, jak moc se od sebe navzájem liší typické případy v souboru zkoumaných čísel. Je-li malá, jsou si prvky souboru většinou navzájem podobné, a naopak velká směrodatná odchylka signalizuje velké vzájemné odlišnosti. Směrodatná odchylka je nejužívanější míra variability.

Variabilita uvnitř skupin popisuje variabilitu v jednotlivých skupinách.

Variabilita mezi skupinami je funkcí, která ukazuje, jak se navzájem liší skupinové průměry.

Rozptyl MS (též střední kvadratická odchylka). Jedná se o charakteristiku variability rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny, která vyjadřuje variabilitu rozdělení souboru náhodných hodnot kolem její střední hodnoty. Podíly $MS = SS / df$ jsou součty čtverců dělené odpovídajícím počtem stupňů volnosti. Tyto veličiny jsou mírou variability pro jednotlivé zdroje.

Stupeň volnosti používá ve dvojím významu. A to jako hodnota parametru, který ovlivňuje tvar některého rozdělení pravděpodobnosti, a jako parametr pro porovnání nějakého testového kritéria pro testování hypotéz s odpovídajícím rozdělením - hodnotou parametru je zpravidla počet současně pozorovaných náhodných veličin, na nichž je testové kritérium založeno, snížený o počet jiných odhadovaných charakteristik.

F-poměr je testová statistika daná poměrem $F = \frac{MS(\text{mezi_skupinami})}{MS(\text{uvnitř_skupin})}$

F-test je běžný test pro statistické porovnání směrodatných odchylek a rozptylů dat souborů. V případě platnosti hypotézy (všechny populační průměry shodné) teorie říká, že číselník F statistiky bude (zhruba) stejný jako jmenovatel, který se podobně jako u regrese nazývá reziduální rozptyl. Pak by tedy hodnota F statistiky byla přibližně rovna jedné. Nyní musíme použít statistické tabulky, abychom se ujistili, zda hodnota F je významně větší než 1, což by ukazovalo, že MS mezi skupinami je významně větší než MS uvnitř skupin, a tedy že se průměry skupin liší. (Pokud by F statistika byla menší než 1, pak to znamená, že variabilita mezi skupinami může být dokonce menší než uvnitř skupin, a tedy tím spíše není důvod zamítnat nulovou hypotézu.) K výpočtu příslušných kritických hodnot i dosažených hladin významnosti lze využít i různé statistické programy. V počítačovém výstupu dostaneme dosaženou hladinu významnosti, tj. pravděpodobnost toho, že vyjde naše, nebo ještě extrémnější (významnější) hodnota testové statistiky za předpokladu, že nulová hypotéza platí.

P-hodnota je obvyklým výstupem počítačových programů na testování hypotéz, uvádí mezní hladinu významnosti, při které bychom hypotézu ještě zamítali. Hypotézu zamítání na hladině α , právě když p-hodnota je menší než α .

P-hodnota testu je u testů, kde má tato definice smysl, pravděpodobnost, s jakou testovací statistika nabývá hodnot „horších“ (více svědčících proti testované hypotéze), než pozorovaná hodnota statistiky.

Zdroj proměnlivosti	Variabilita	Stupně volnosti	Odpovídající druh rozptylu	Testová stat. F-poměr	P-value
meztřídní	$SS_B = \sum_{i=1}^k n_i \cdot (\bar{X}_i - \bar{X})^2$	$k - 1$	$S_B^2 = \frac{SS_B}{k - 1}$	$F = \frac{S_B^2}{S_W^2}$	viz. def.
vnitřní	$SS_W = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2$	$N - k$	$S_W^2 = \frac{SS_W}{N - k}$		
totální	$SS_{TOT} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X})^2$	$N - 1$			

Tab. 3: Tabulka analýzy rozptylu

(kde k je počet tříd, N je počet pozorování v jednotlivých třídách, S_B je rozptyl mezi třídami, S_W je rozptyl uvnitř tříd, F -test je Fisherova-Snedecorova výběrová statistika)

Histogram

Pro větší názornost používáme místo tabulek grafu. Histogram je graf, kdy na vodorovnou osu znázorníme třídy a na svislou osu četnosti či relativní četnosti. Často se používá ve tvaru, kdy se hodnota odpovídající třídě znázorní jako sloupec s intervalem třídy jako základnou a výška je dána četností. Histogram je tedy graf (obvykle jednoduchý sloupcový graf), jenž použije skupinu dat k výpočtu individuální a kumulativní četnosti oblasti buněk dat a tříd dat, jež spadají do několika intervalů (označovaných jako hranice tříd).

Řada vlastností datového souboru se dá vyčíst z tvaru histogramu. Ty odpovídají grafu hustoty u rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny. Rozlišuje se několik charakteristických průběhů těchto grafů.

- souměrné - ve tvaru zvonu, trojúhelníku či rovnoměrný;
- nesouměrné - ve tvaru J, obráceného J, vpravo či vlevo protažené;
- podle počtu vrcholu jedno-, dvou-, či více-vrcholové. [14]

Tvar histogramu má souvislost s hustotou naměřených hodnot zobrazených na číselné ose. Čím vyšší počet bodů v intervalu (čím je větší jejich hustota), tím je vyšší sloupeček histogramu.

6 Praktická část

Praktická část této práce se týká statistického vyhodnocení demonstračních úloh. Konkrétně se jedná o měření otáček HDD a měření vibrací motorku s vrtulkou při různém zatížení. Tyto demonstrační úlohy budou sloužit jako základ pro ověření metodiky měření a statistického vyhodnocení výsledků.

6.1 Měření otáček HDD

V této úloze si budeme moci ověřit skutečné otáčky rotujících ploten HDD (Hard Disc Drive). Jako senzor je použit akcelerometr typu 4394, který je upevněn na krytu vřetena jež pohání elektromotor. Při upevnění senzoru jsou dodrženy podmínky a pravidla pro zacházení a upevňování senzorů. Jako ukázkový HDD byl použit laboratorní harddisk, dále jen disk, který byl napájen z počítačového zdroje přes klasický napájecí konektor molex.



Obr. 20: Měřicí akcelerometr 4394 type

Data jsou na pevném disku uložena pomocí magnetického záznamu. Disk obsahuje kovové nebo skleněné desky - tzv. plotny pokryté tenkou magneticky měkkou vrstvou. Hustota datového záznamu se udává jako počet bitů na měrnou jednotku plochy disku [bitů/inch²], [bitů/mm²]. Plotny jsou neohebné (odtud pevný disk). Ploten bývá v dnešních discích často několik (1 – 3, výjimečně až 5). Disk se otáčí na tzv. vřetenu poháněném elektromotorem. Standardní 3,5" palcové disky mají až 4 plotny a 8 hlav (po jedné hlavě z obou stran plotny). HDD s nejmenší kapacitou mají obvykle pouze 1 plotnu, která je navíc použita jen z jedné strany.

V běžných discích plotny rotují rychlostí 7 200 ot/min, vyšší třída disků do pracovních stanic se točí rychlostí 10 000 ot/min a u některých serverových disků i 15 000 ot/min. Opačnou stranou jsou takzvané "zelené disky" WD green power otáčející se rychlostí jen 5 400 ot/min. Jejich

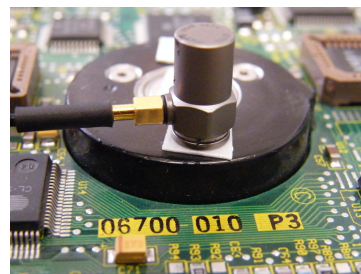
využití se nalézá tam, kde je přednější nižší spotřeba, nižší teplota a nižší hluk na úkor nižšího výkonu (např. HTPC). Disky v notebookech mají nejčastěji 5 400 ot/min, existují ovšem i notebookové modely otáčející se rychlostí 7 200 ot/min, jakožto modely používající pouze 4 200 ot/min, to jsou nejčastěji buď velmi staré disky nebo moderní se specializovaným použitím např. ve videokamerách s fyzickými rozměry menšími než klasické notebookové disky. Při 7 200 ot/min je obvodová rychlost plotny zhruba 30 km/h (pro 3,5palcový disk). Otáčky disku společně s hustotou záznamu a rychlostí vystavovacího mechanismu určují celkový výkon disku. [13]

Následující text vysvětluje přepočet Hertzů na otáčky za minutu.

Otáčky za minutu, značka jednotky ot/min, anglickou zkratkou také **RPM** (*revolutions per minute*) je vedlejší jednotkou soustavy SI pro frekvenci, tj. počet pravidelně se opakujících jevů za jednotku času, v tomto případě za minutu. Používá se zejména pro vyjádření rychlosti otáčení nejrůznějších mechanických zařízení - točivých strojů, například motorů, turbín apod. Udává počet plných otočení, které zařízení, nebo některá jeho část udělá za minutu. Jednotka se užívá v uvedených případech místo jednotky hertz; hodnota v ot/min je přesně $60\times$ vyšší, tj. $1\text{ Hz} = 60\text{ ot/min}$. [15]



Obr. 21:Krokový motor



Obr. 22:Umístění senzoru

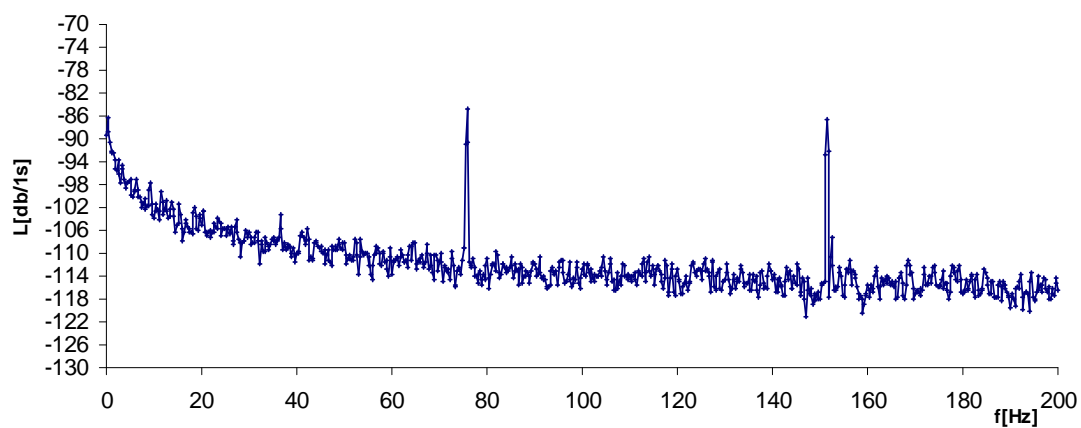


Obr. 23:Měřicí pracoviště

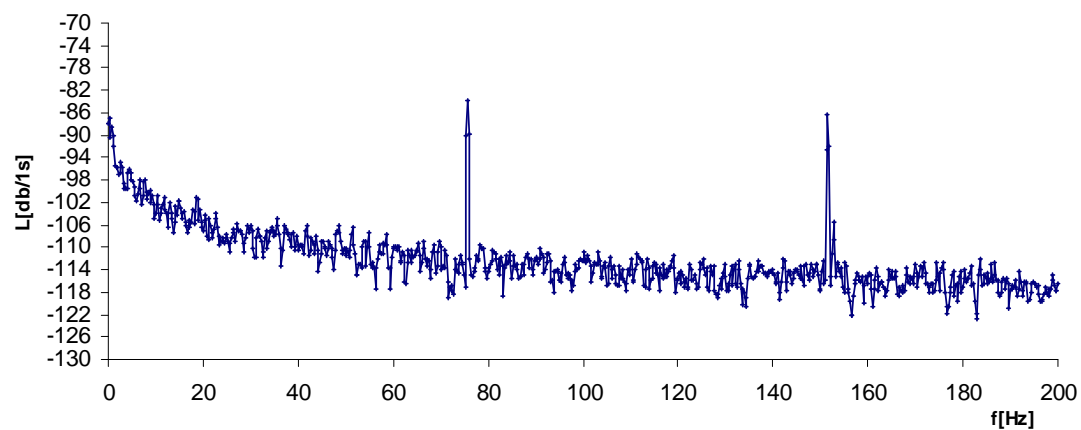
Měření, která jsem provedl byla pojata v rámci statistického vyhodnocení měření (proběhlo pět měření) s úmyslem určit rychlost otáčejících se ploten disku a případnou odchylku. Následující spektra jsou vyhotoveny z naměřených dat v prostředí Excel a MatLab.

Nastavení PULSE:

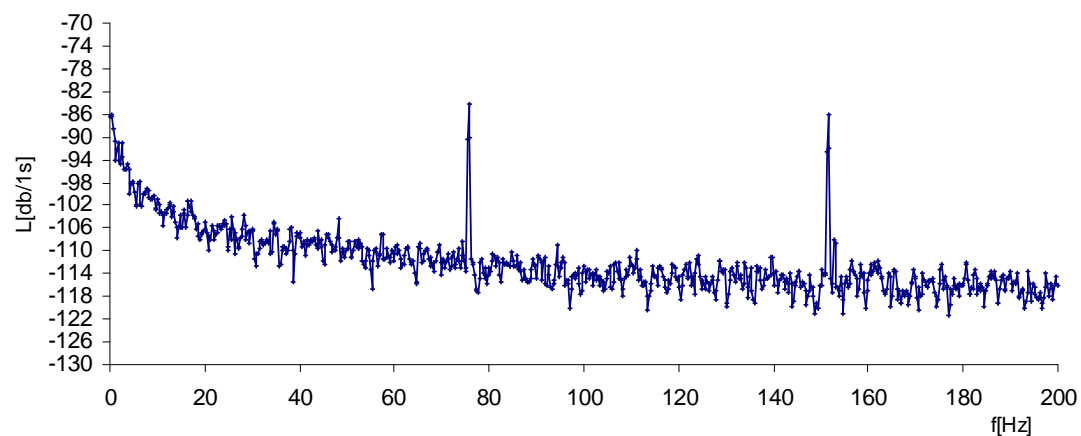
- Lines 800
- Span 200 Hz
- Overlap 66,67%
- Averaging Exponencial



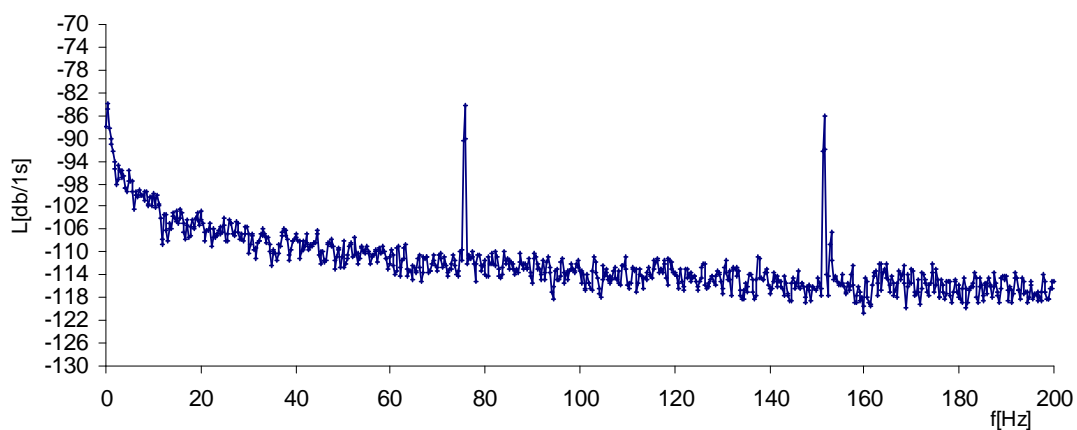
Obr. 24: Průběh 1. měření spektra rychlosti otáček HDD



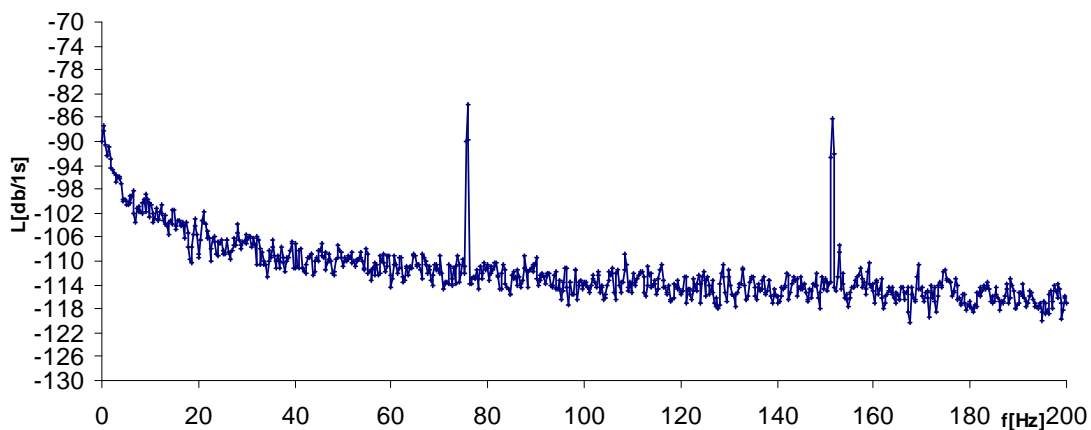
Obr. 25: Průběh 2. měření spektra rychlosti otáček HDD



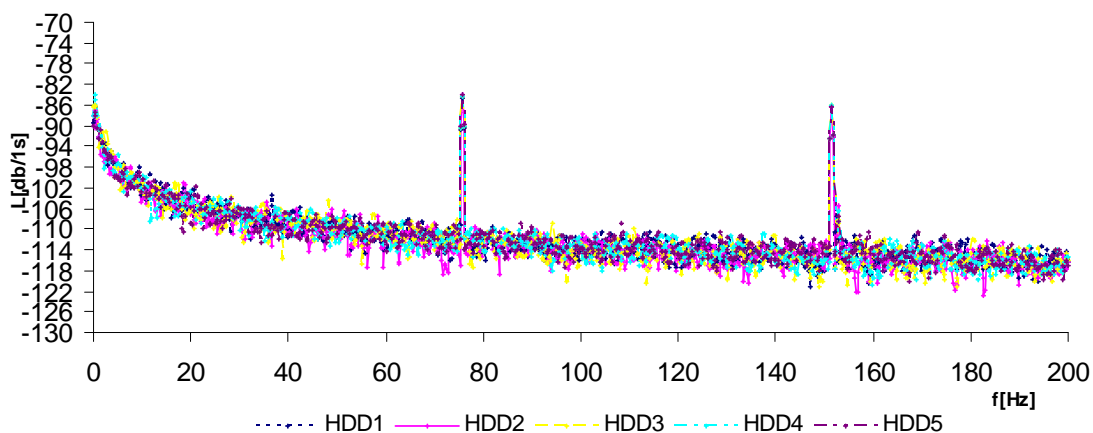
Obr. 26: Průběh 3. měření spektra rychlosti otáček HDD



Obr. 27: Průběh 4. měření spektra rychlosti otáček HDD



Obr. 28: Průběh 5. měření spektra rychlosti otáček HDD



Obr. 29: Průběhy měřených spekter rychlosti otáček HDD

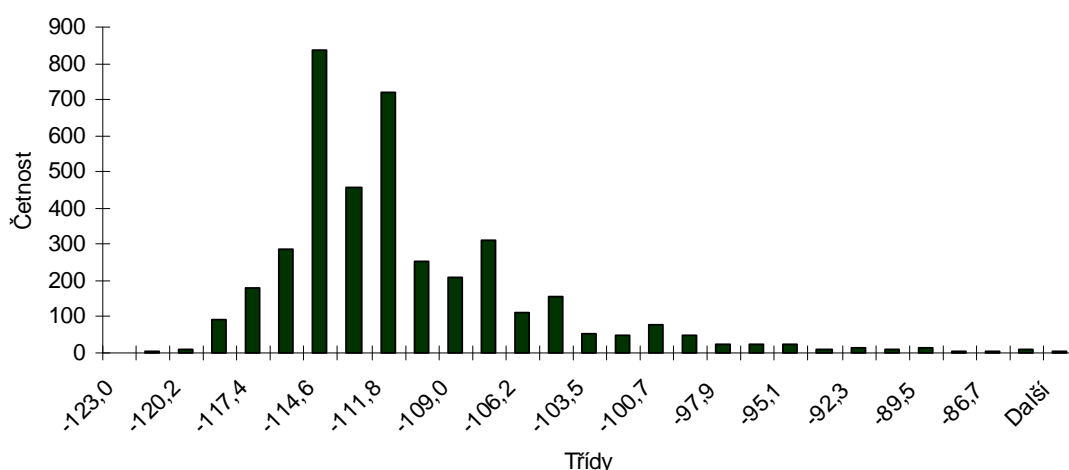
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
hdd1	801	-89399	-111,609	29,67979
hdd2	801	-89840,4	-112,16	31,38615
hdd3	801	-89650,1	-111,923	32,36836
hdd4	801	-89516,2	-111,756	30,95452
hdd5	801	-89357,9	-111,558	28,17069

ANOVA

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	193,7091	4	48,42729	1,587161	0,1748095	2,374153
Všechny výběry	122047,6	4000	30,5119			
Celkem	122241,3	4004				

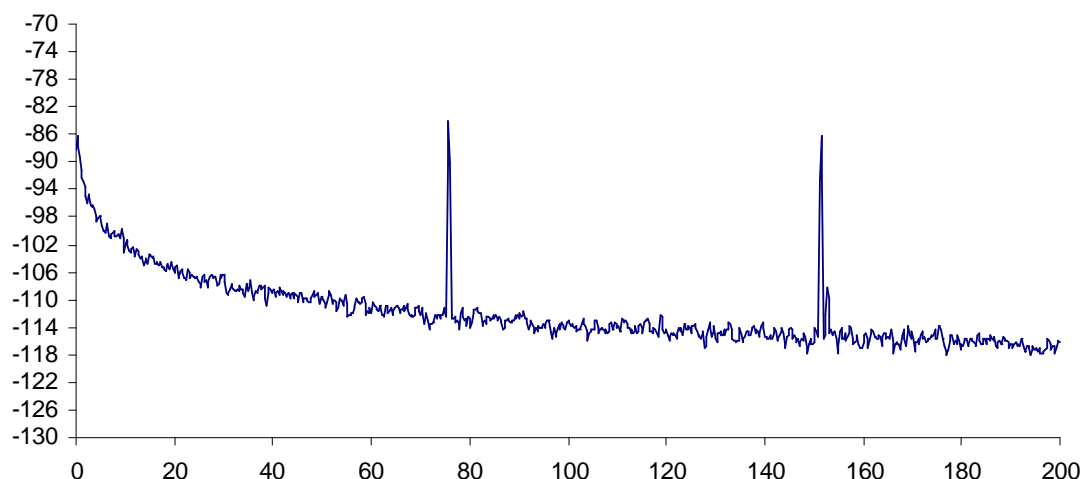
Obr. 30: Statistická analýza naměřených spekter

Histogram



Obr. 31: Histogram naměřených dat

Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty pro všech pět provedených měření. Z hodnot průměrů a rozptylů pro jednotlivá měření vidíme minimální rozdíly. Z toho lze usuzovat, že měření jsou si velmi podobná a výsledná hodnota otáček disku nebude vykazovat velkou diferencí. Hodnota rozptylu (průměrných čtverců) pro všechny výběry je 30,5119. Směrodatná odchylka z toho činí 5,523. Tato hodnota je dostatečně malá, abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si navzájem podobné. Z hodnoty P, která je větší než zadaná hodnota α (5%), můžeme potvrdit nulou hypotézu. Histogram má normální rozdělení, což potvrzuje shodnost měření.



Obr. 32: Průměrný průběh spektra rychlosti otáček HDD

Obrázek 32 reprezentuje průměrný průběh vyhodnocený jako aritmetický průměr všech naměřených spekter signálu. Hodnota první harmonické je 75,8Hz.

Jelikož se jedná o starší disk s neuvedenou specifikací, nelze výslednou hodnotu otáček plotem disku určit s ověřením od výrobce. Nicméně lze předpokládat, že rychlost otáček disku je 5400 ot/min. Výslednou hodnotu otáček HDD jsem vypočetl z grafu průměrného průběhu spektra otáček disku jako hodnotu frekvence první harmonické (osa x) vynásobenou časovým přepočtem na minuty (ot/min). (viz. výše: otáčky za minutu)

$$N = 7,58E + 01 \cdot 60 = \underline{4548} \text{ ot} / \text{min}$$

Výsledná rychlost otáček je tedy 4548 ot/min (tj. 75,8Hz – 1. harmonická). Tato hodnota je vztažena ke klidovým otáčkám disku, kdy nedochází k vyhledávání dat a pohybu hlav disku.

Na porovnání otáček jsem provedl ještě další dvě měření s rozdílným umístěním senzoru. Výsledky byly srovnatelné s výše uvedenými, a proto je zde dále neuvádím.

6.2 Měření motorku s vrtulkou

Podstatou této úlohy je opět statistické vyhodnocení naměřených výsledků se zaměřením na chování spektra při různé zátěži motorku. Jako zátěž byla použita vrtulka. Nejprve jsem proměřil spektrum vrtulky bez jakékoli deformace listu této vrtulky. Následovala měření, při kterých jsem postupným zkracováním upravoval list vrtulky a měřil chování spektra na tyto deformace. Poté jsem na zkrácený konec listu vrtulky upevňoval protizávaží, které mělo za účel vyrovnat přetížení na deformované straně vrtulky, resp. vyvažovat vrtulku k dosažení co nejbližšího spektra původní nedeformované vrtulky. Jako vyvažovací prvek jsem z hlediska adekvátní váhy a upevnění použil oboustrannou pěnovou lepicí pásku nastříhanou na čtverce o rozměrech 1,5x1,5cm. Délky zkrácených listů vrtulek jsou 4,5cm u méně zkrácené vrtulky a 3,5cm u více zkrácené vrtulky.

Specifikace použitého motorku:

Standardní elektromotor MIG 280 sporting (6V, 15000 ot/min). Vhodný pro letecké modeláře či jiné universální použití. K napájení je doporučeno 6 nebo 7 nebo 8 článků NiCd, NiMH nebo 2čl Li-ION baterií (7V). Motor má větrací otvory.

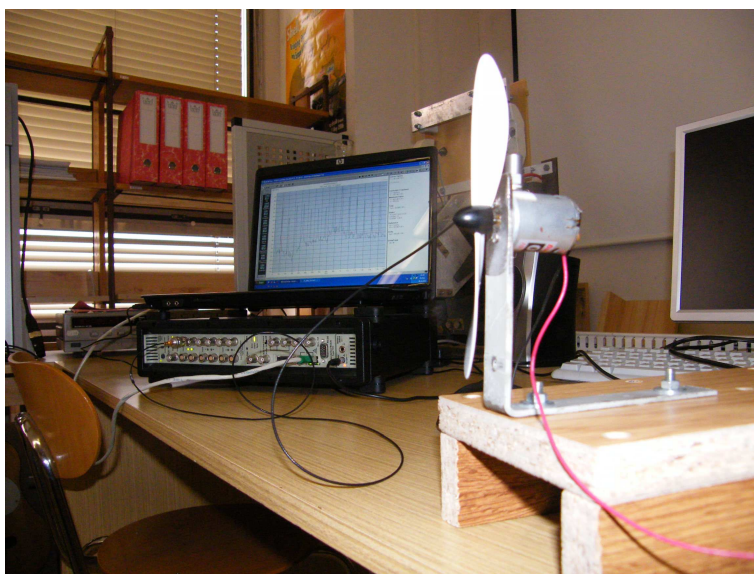
- Jmenovité napětí: 6 V
- Provozní napětí: 4,8...8,4 V (4-8 článků)
- Otáčky naprázdno: 15000 rpm
- Délka elektromotoru: 30 mm
- Průměr elektromotoru 24mm
- Délka hřídele: 8 mm Průměr hřídele:2,0 mm
- Hmotnost: 43 g
- Výrobce: MEGAMOTOR



Obr. 33: Elektromotor MIG 280 sporting



Obr. 34: Vrtulky Gunther 125/110 pro motory 280, 400



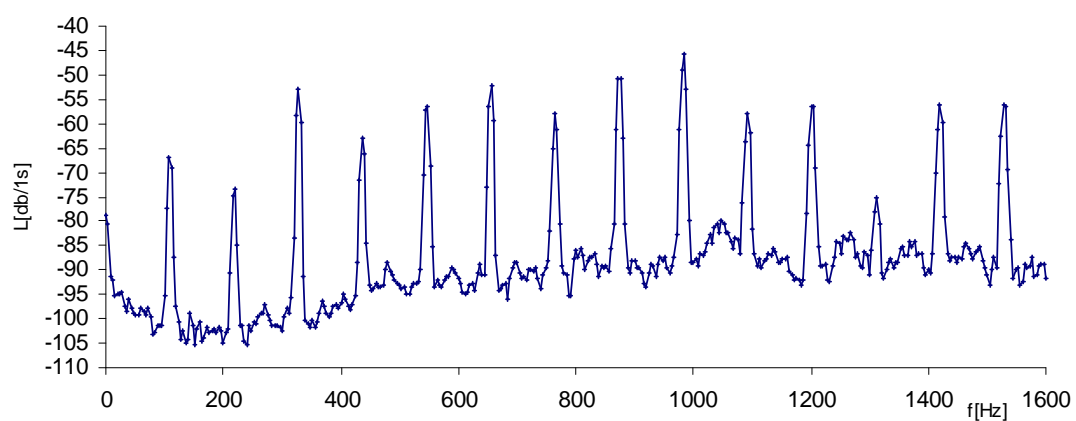
Obr. 35: Měřicí pracoviště

6.2.1 Měření spektra motoru nedeformované vrtulky

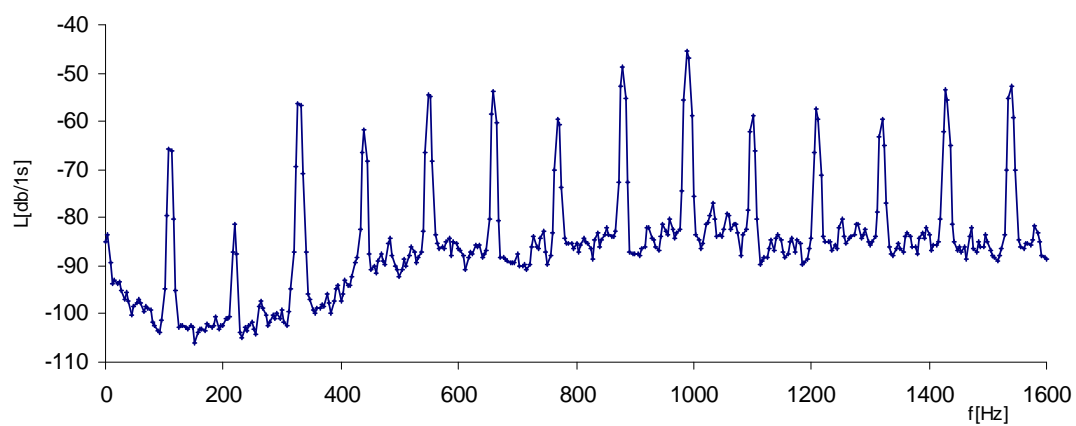
Nastavení PULSE:

- Lines 400
- Span 1600 Hz
- Overlap 66,67%
- Averaging Exponencial

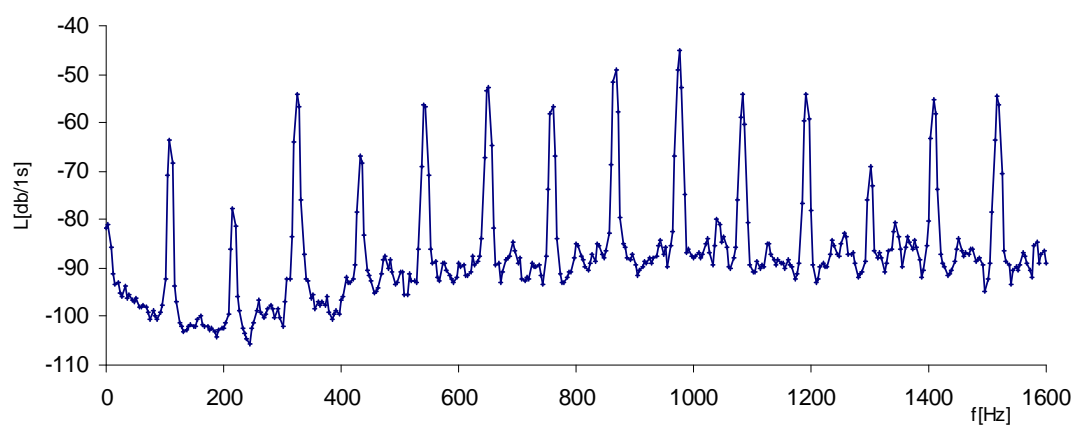
Výsledky měření neupravené vrtulky



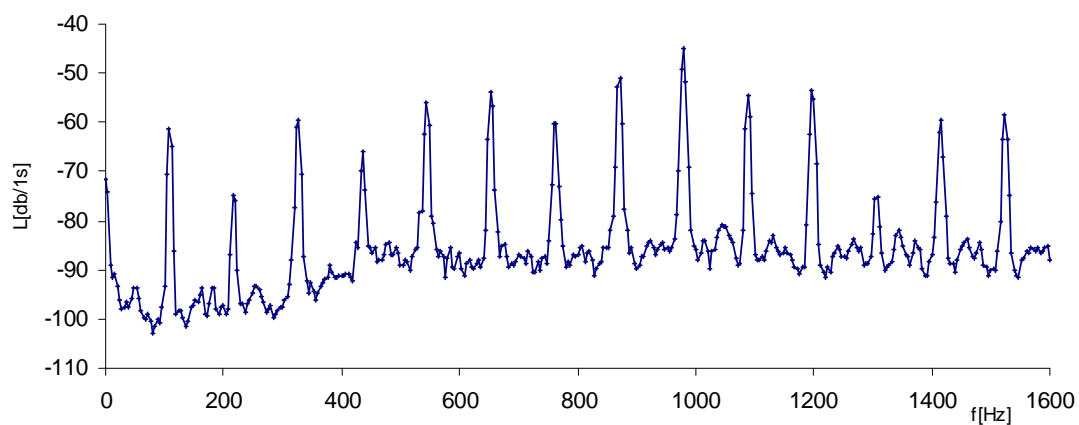
Obr. 36: Průběh 1. měření spektra vibrací motoru vrtulky



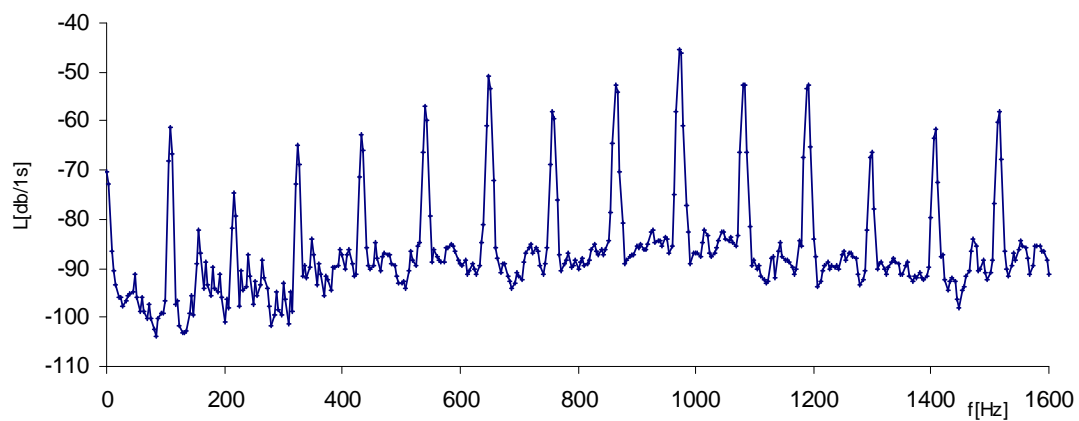
Obr. 37: Průběh 2. měření spektra vibrací motoru vrtulky



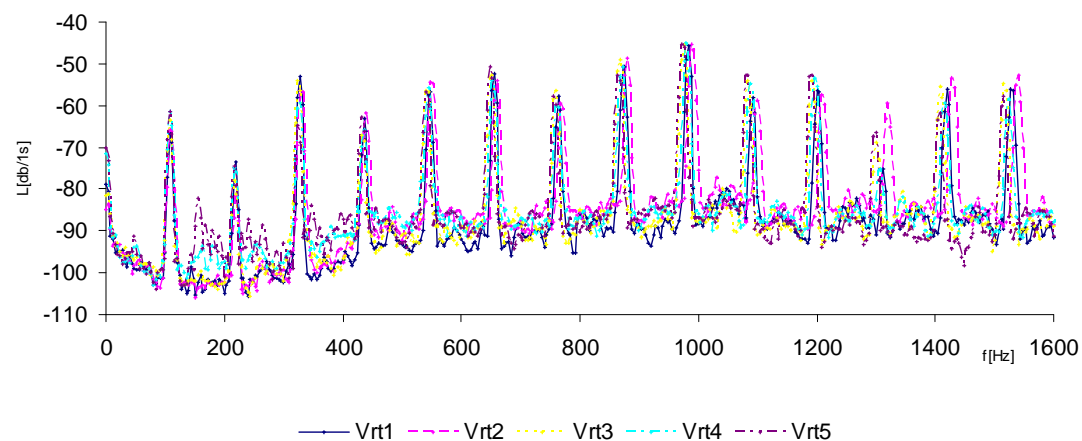
Obr. 38: Průběh 3. měření spektra vibrací motoru vrtulky



Obr. 39: Průběh 4. měření spektra vibrací motoru vrtulky



Obr. 40: Průběh 5. měření spektra vibrací motoru vrtulky



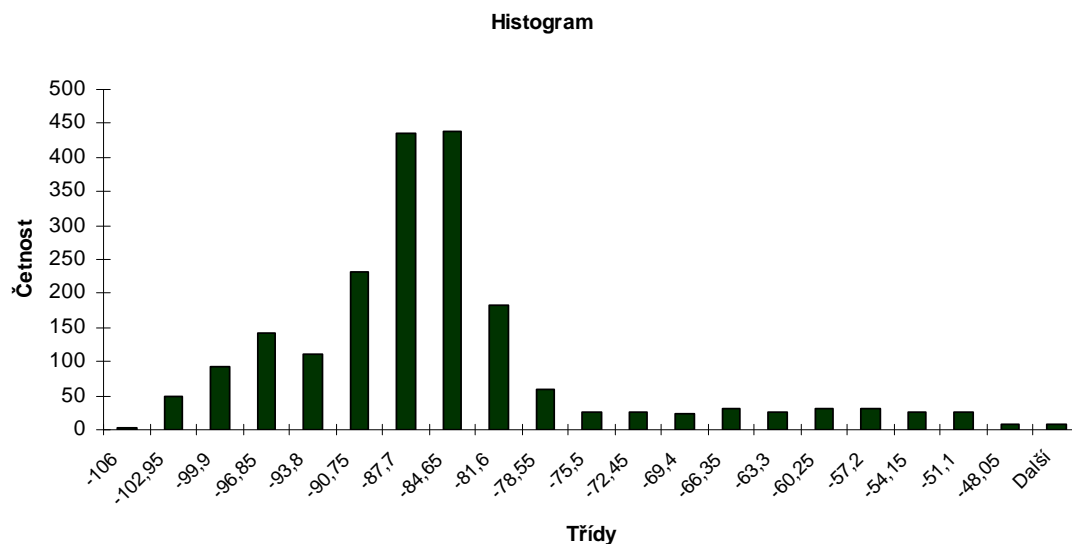
Obr. 41: Průběhy všech měřených spekter vibrací motoru vrtulky

<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
vtule1	401	-35296,2	-88,0204	129,3382
vtule2	401	-34373,1	-85,7185	128,5584
vtule3	401	-35019,8	-87,3312	122,6322
vtule4	401	-34392,2	-85,7661	98,478
vtule5	401	-34704,2	-86,5441	101,9867

ANOVA

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	1603,607	4	400,9018	3,45014	0,0081016	2,376377
Všechny výběry	232397,4	2000	116,1987			
Celkem	234001	2004				

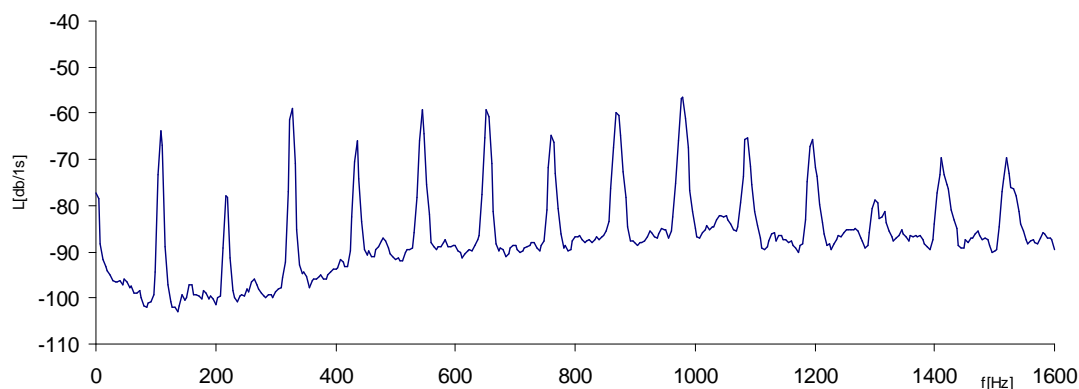
Obr. 42: Statistická analýza naměřených spekter



Obr. 43: Histogram naměřených dat

Z naměřených hodnot a grafů vyplývá následující. 1. harmonická určující otáčky motoru je na hodnotě 112Hz (cca 6720 ot/min). Následují peaky násobků první harmonické do konce rozsahu měřeného spektra (14 harmonických). Na posledním grafu lze pozorovat průběhy jednotlivých měření a rozdílnost mezi nimi. Z pátého měření se do společného grafu zanesla asi největší chyba dobře viditelná za první a druhou harmonickou jako zvýšení amplitudy průběhu. To mohlo být způsobeno vlivem okolí a lze ji zanedbat jako statistickou chybu. Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty pro všech pět provedených měření. Z hodnot průměrů pro jednotlivá měření vidíme minimální rozdíly i když rozptyl jednotlivých měření má klesající tendenci. Z toho lze usuzovat, že měření jsou si podobná. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 116,1987. Směrodatná odchylka z toho činí 10,78. Tato hodnota je dostatečně malá,

abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si navzájem podobné. Z hodnoty P , která je zde menší než zadaná hodnota α (5%), můžeme vyvrátit nulou hypotézu. Histogram má normální rozdělení s mírným náznakem kladné šikmosti.



Obr. 44: Průměrný průběh spektra vibrací motoru vrtulky

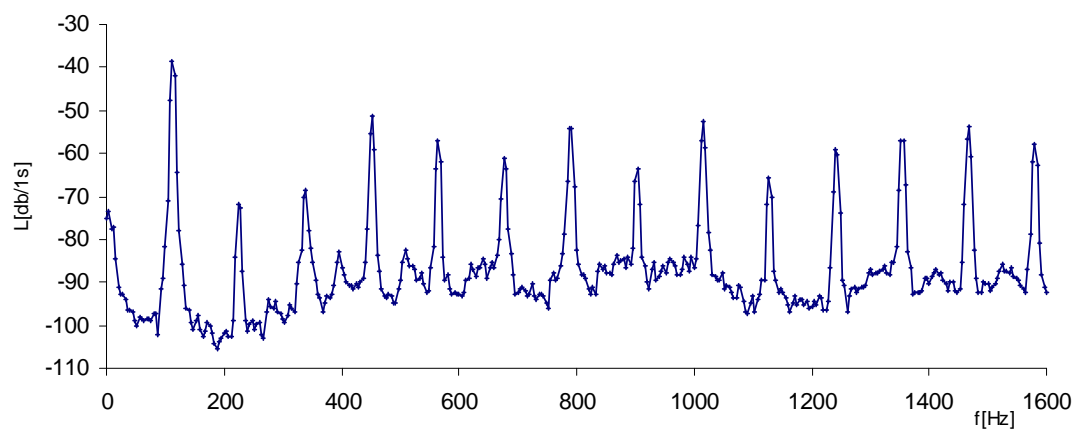
Obrázek 44 reprezentuje průměrný průběh vyhodnocený jako aritmetický průměr všech naměřených spekter signálu.

6.2.2 Měření spektra motoru s malou deformací vrtulky

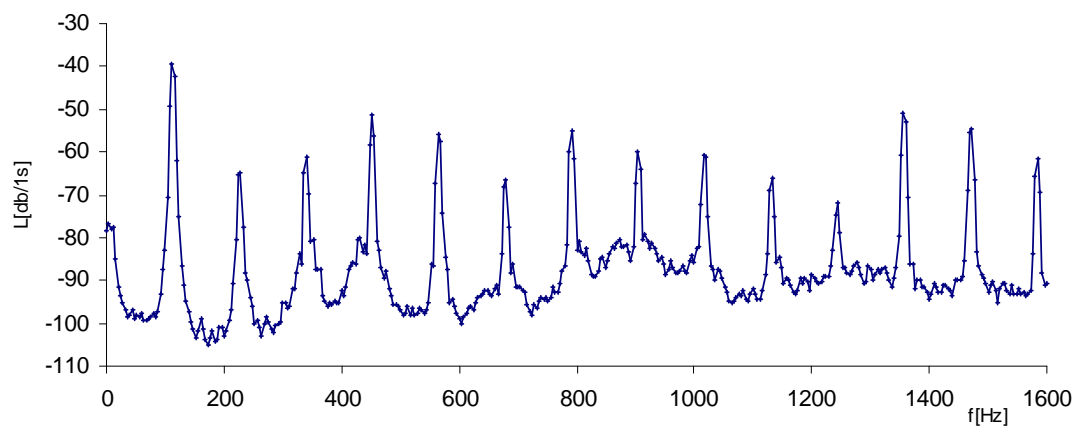
Nastavení PULSE:

- Lines 400
- Span 1600 Hz
- Overlap 66,67%
- Averaging Exponencial

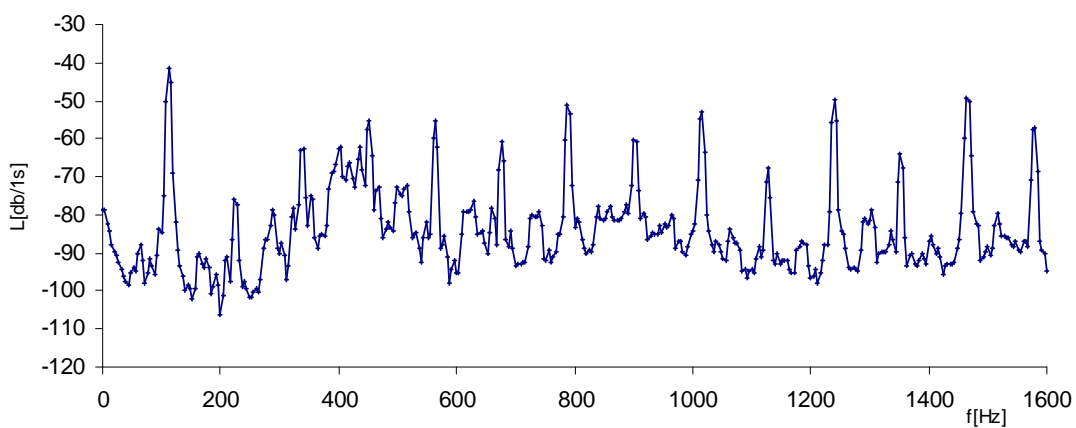
Výsledky měření upravené vrtulky



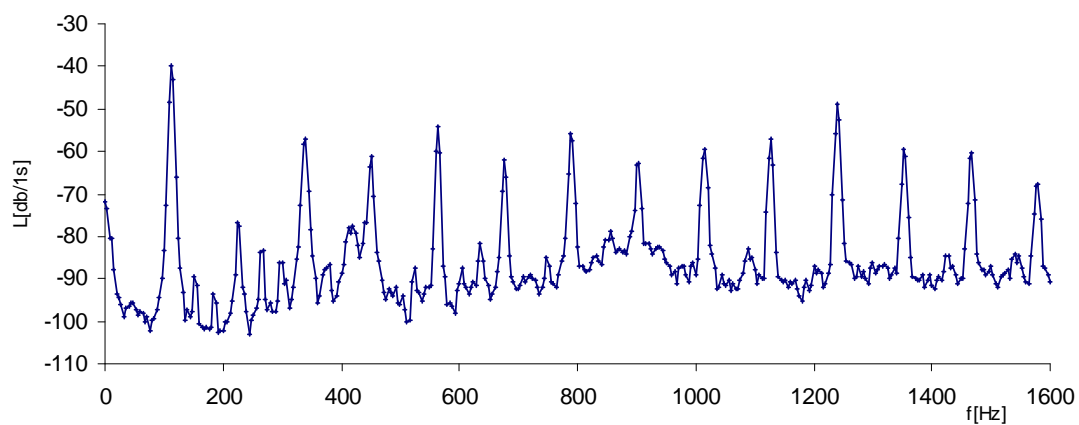
Obr. 45: Průběh 1. měření spektra vibrací motoru vrtulky (malá deformace listu vrtulky)



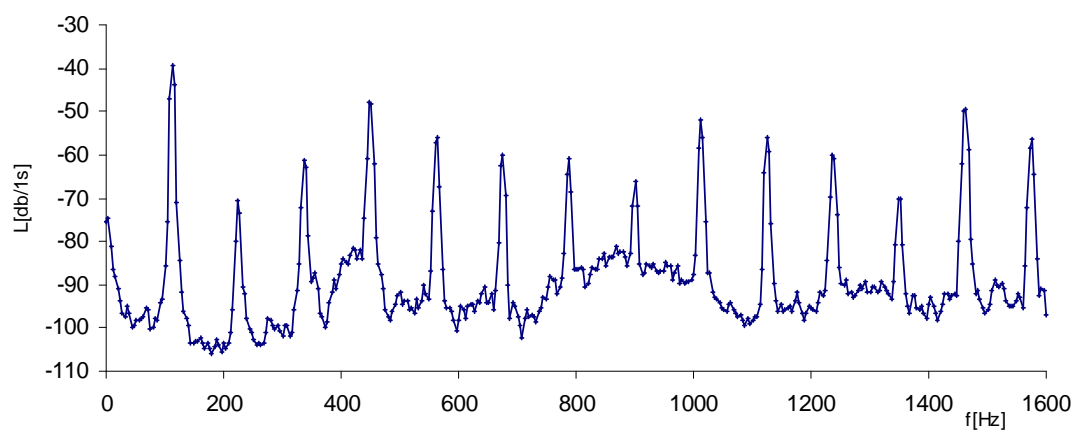
Obr. 46: Průběh 2. měření spektra vibrací motoru vrtulky (malá deformace listu vrtulky)



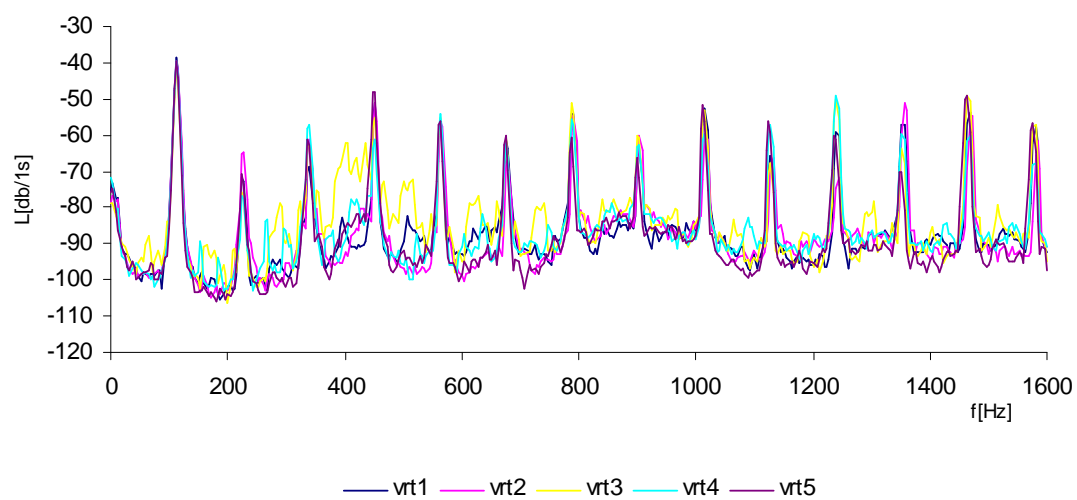
Obr. 47: Průběh 3. měření spektra vibrací motoru vrtulky (malá deformace listu vrtulky)



Obr. 48: Průběh 4. měření spektra vibrací motoru vrtulky (malá deformace listu vrtulky)



Obr. 49: Průběh 5. měření spektra vibrací motoru vrtulky (malá deformace listu vrtulky)



Obr. 50: Průběhy spekter vibrací motoru vrtulky (malá deformace listu vrtulky)

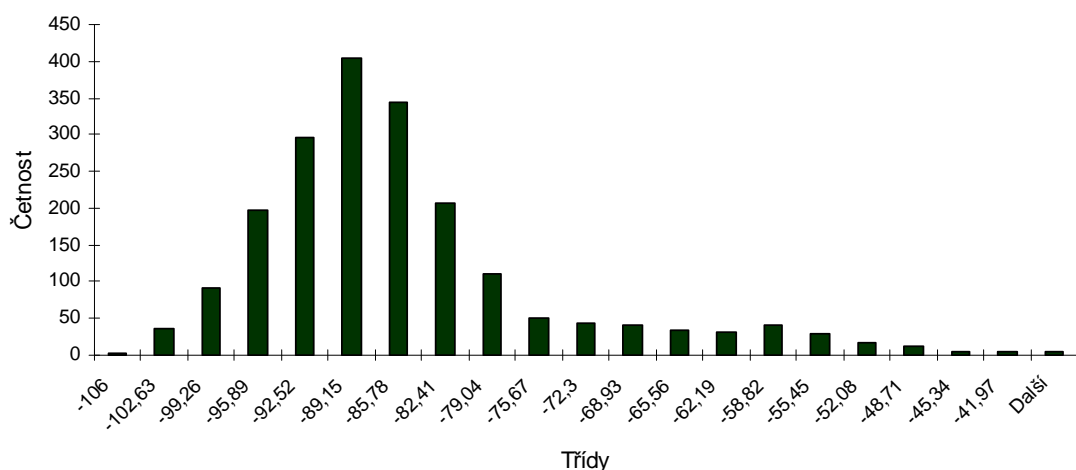
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
vrtule1	401	-35015,7	-87,3209	118,2877
vrtule2	401	-35196,5	-87,7718	118,7957
vrtule3	401	-33690	-84,015	122,3623
vrtule4	401	-34607,8	-86,3037	109,5091
vrtule5	401	-35678,2	-88,9731	139,8734

ANOVA

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	5578,381	4	1394,595	11,45311	3,414E-09	2,376377
Všechny výběry	243531,3	2000	121,7656			
Celkem	249109,7	2004				

Obr. 51: Statistická analýza naměřených spekter

Histogram

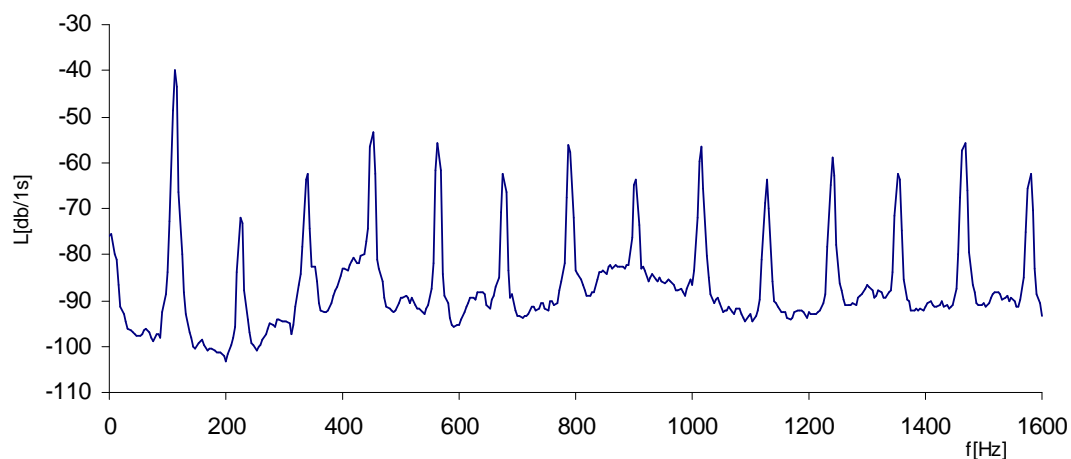


Obr. 52: Histogram naměřených dat

Z naměřených grafů je vidět mírné zvýšení rušení v rozsahu spektra cca 380Hz až 1100Hz. Otáčková frekvence první harmonické má hodnotu 112Hz (tj. 6720 ot/min). Společný graf také ukazuje odlišnost jednotlivých měření, kde si lze všimnout změny v průbězích právě v oblasti středního měřeného rozsahu a zvýšení amplitud peaků v závěru spektra měření.

Z třetího měření se do společného grafu zanesla asi největší chyba dobře viditelná mezi třetí a pátou harmonickou. Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty pro všech pět provedených měření. Z hodnot průměrů pro jednotlivá měření vidíme minimální rozdíly i když rozptyl jednotlivých měření má klesající tendenci. Z toho lze usuzovat, že měření jsou si podobná. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 121,7656. Směrodatná odchylka z toho činí 11,04. Tato hodnota je dostatečně malá, abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si

navzájem podobné. Z hodnoty P , která je zde menší než zadaná hodnota α (5%), můžeme vyvrátit nulou hypotézu. Histogram má normální rozdělení.



Obr. 53: Průměrný průběh spektra vibrací motoru vrtulky (malá deformace listu vrtulky)

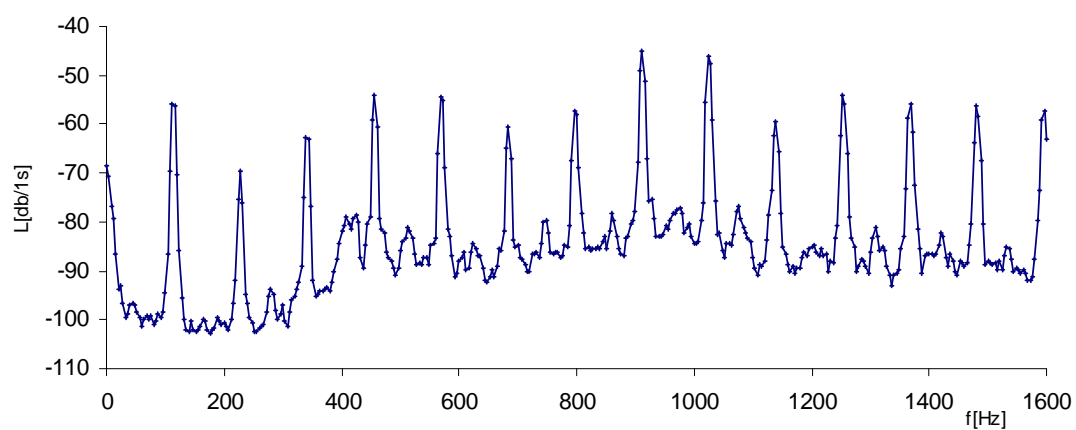
Obrázek 53 reprezentuje průměrný průběh vyhodnocený jako aritmetický průměr všech naměřených spekter signálu.

6.2.3 Měření spektra motoru s malou deformací vrtulky a vyvážením (1)

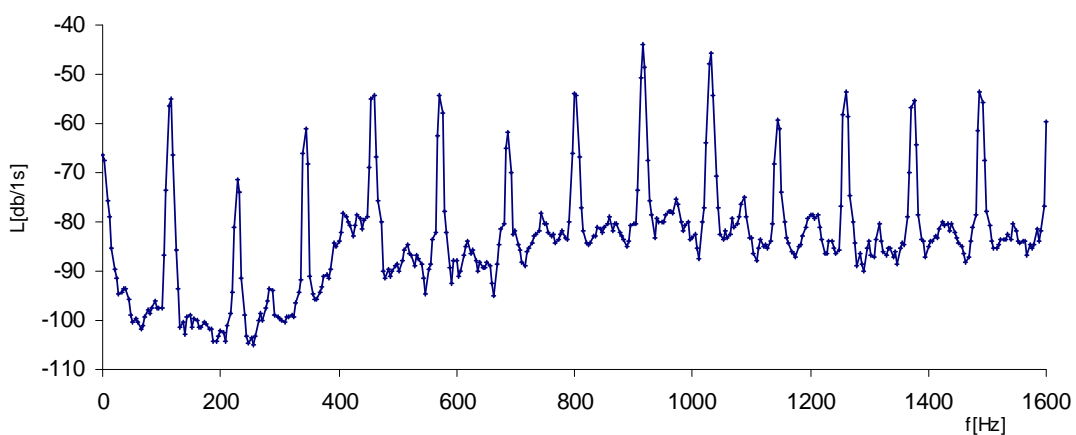
Nastavení PULSE:

- Lines 400
- Span 1600 Hz
- Overlap 66,67%
- Averaging Exponencial

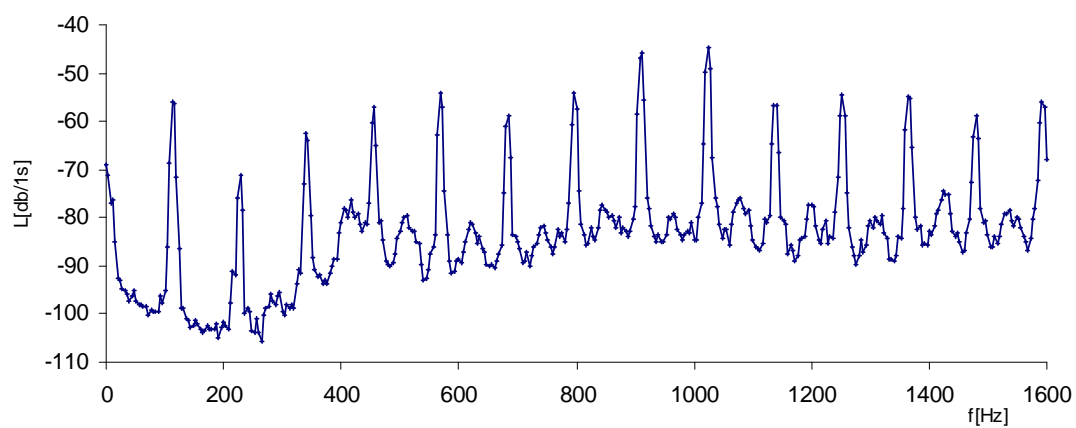
Výsledky měření upravené vrtulky



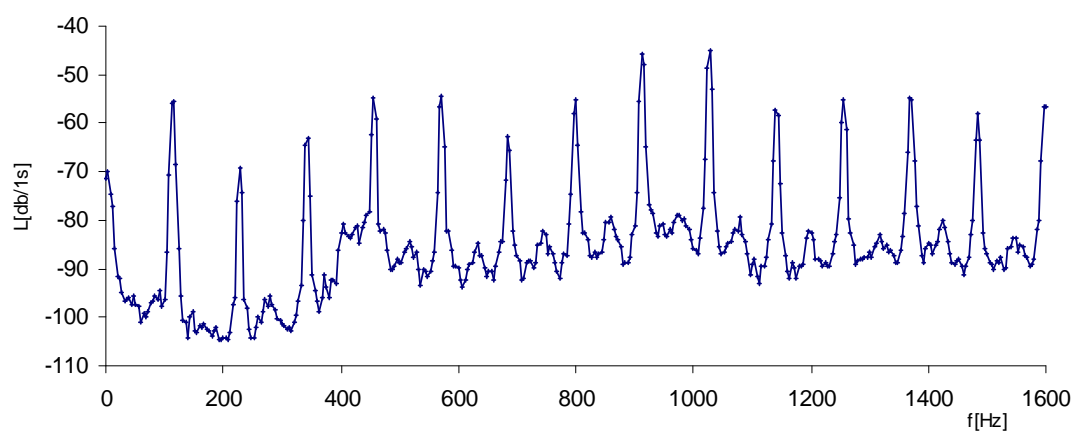
Obr. 54: Průběh 1. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)



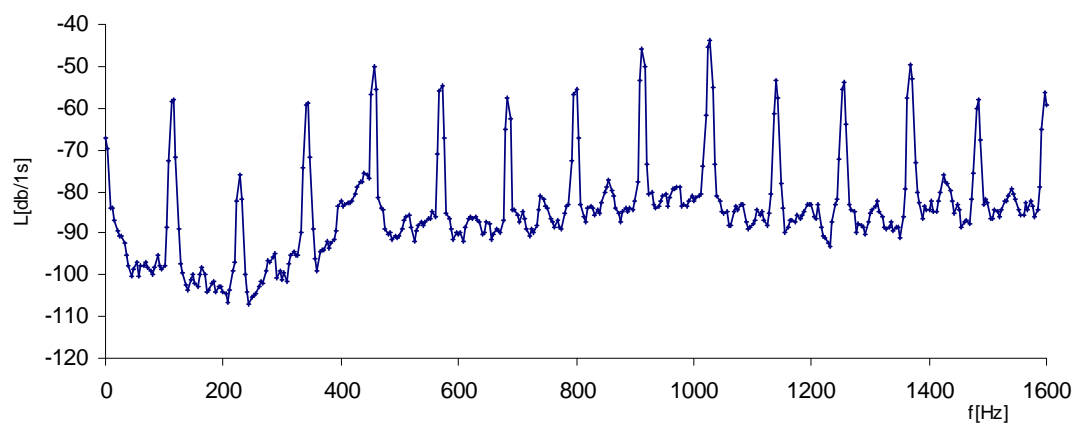
Obr. 55: Průběh 2. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)



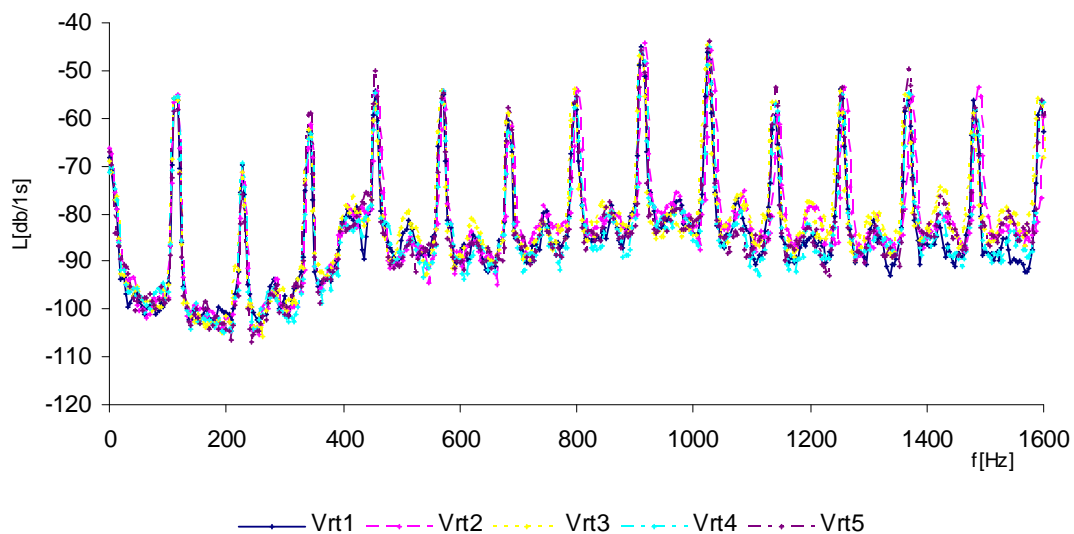
Obr. 56: Průběh 3. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)



Obr. 57: Průběh 4. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)



Obr. 58: Průběh 5. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)



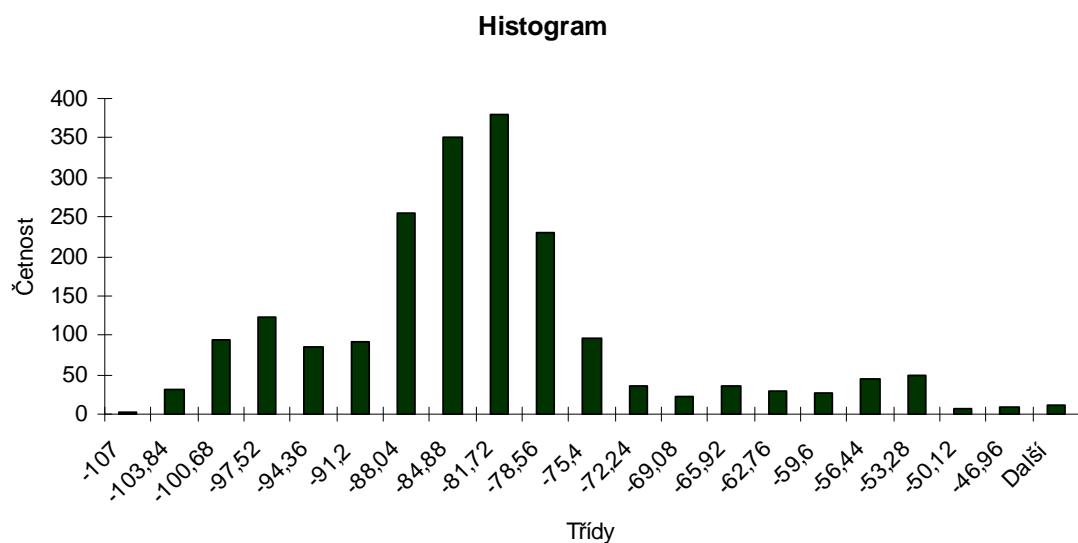
Obr. 59: Průběhy všech spekter vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)

<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
vrtule1	401	-33910,3	-84,5643	127,2152
vrtule2	401	-33536,7	-83,6327	126,0805
vrtule3	401	-33314,5	-83,0786	129,9436
vrtule4	401	-34194,9	-85,2741	126,6113
vrtule5	401	-33939	-84,6359	132,1209

ANOVA

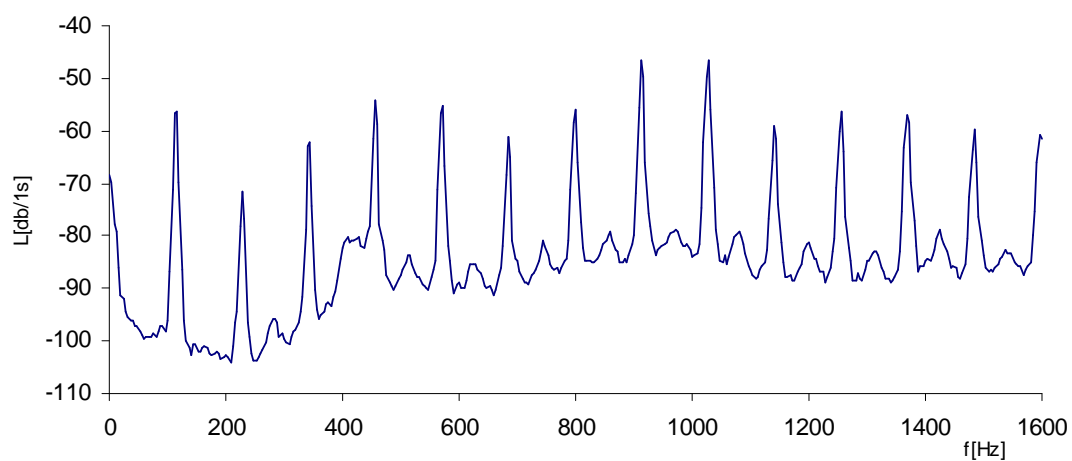
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	1222,648	4	305,6621	2,380652	0,0496496	2,376377
Všechny výběry	256788,6	2000	128,3943			
Celkem	258011,3	2004				

Obr. 60: Statistická analýza naměřených spekter



Obr. 61: Histogram naměřených dat

Na zobrazených grafech je měření spektra motoru s lehkým vyvážením zkrácené vrtulky. Spektrum se již teď značně přibližuje původnímu spektru neupravené vrtulky s malým zvlněním před čtvrtou harmonickou (4x). Otáčky vrtulky zůstaly na hodnotě 112Hz (tj. 6720 ot/min). Společný graf ukazuje odlišnost jednotlivých měření, kde si lze všimnout poměrně minimálních změn a to jak už v amplitudách jednotlivých peaků tak i výjimečných převýšení mezi harmonickými. Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty pro všech pět provedených měření. Z hodnot průměrů a rozptylů pro jednotlivá měření vidíme minimální rozdíly. Z toho lze usuzovat, že měření jsou si podobná. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 128,3943. Směrodatná odchylka z toho činí 11,33. Tato hodnota je dostatečně malá, abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si navzájem podobné. Z hodnoty P, která je zde menší než zadaná hodnota α (5%), můžeme zamítnout nulou hypotézu. Histogram má normální rozdělení.



Obr. 62: Průměrný průběh spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)

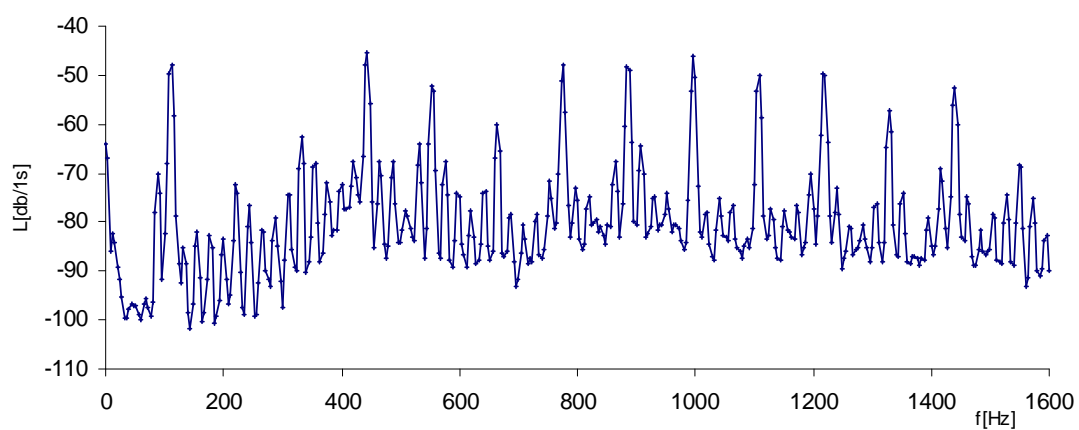
Obrázek 62 reprezentuje průměrný průběh vyhodnocený jako aritmetický průměr všech naměřených spekter signálu.

6.2.4 Měření spektra motoru s malou deformací vrtulky s vyvážením (2)

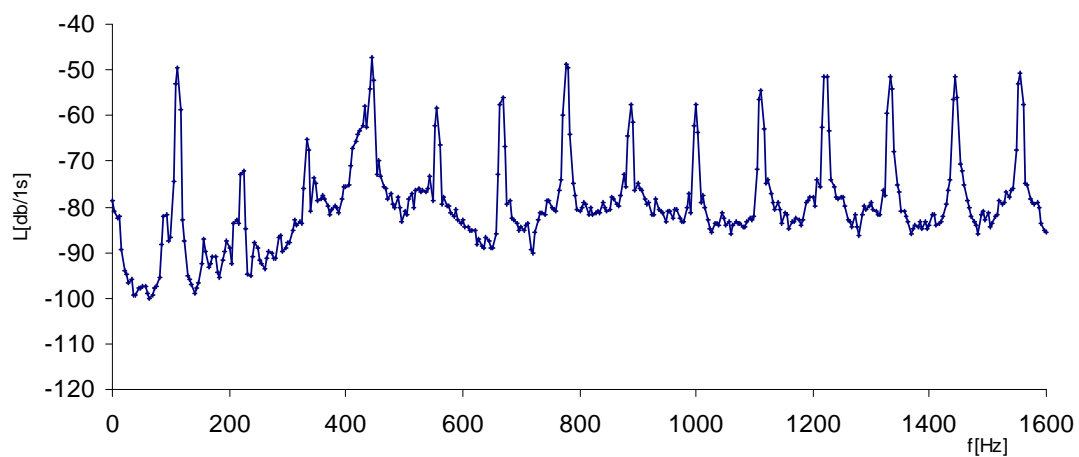
Nastavení PULSE:

- Lines 400
- Span 1600 Hz
- Overlap 66,67%
- Averaging Exponencial

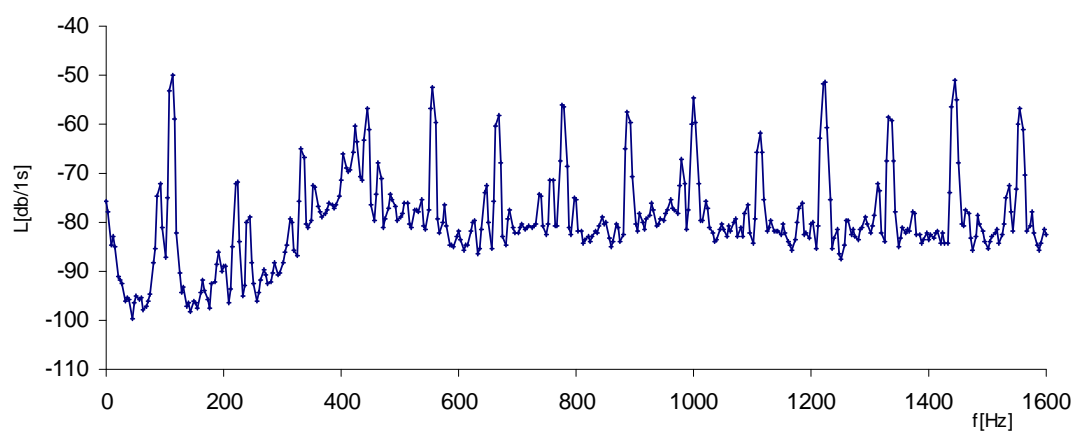
Výsledky měření upravené vrtulky



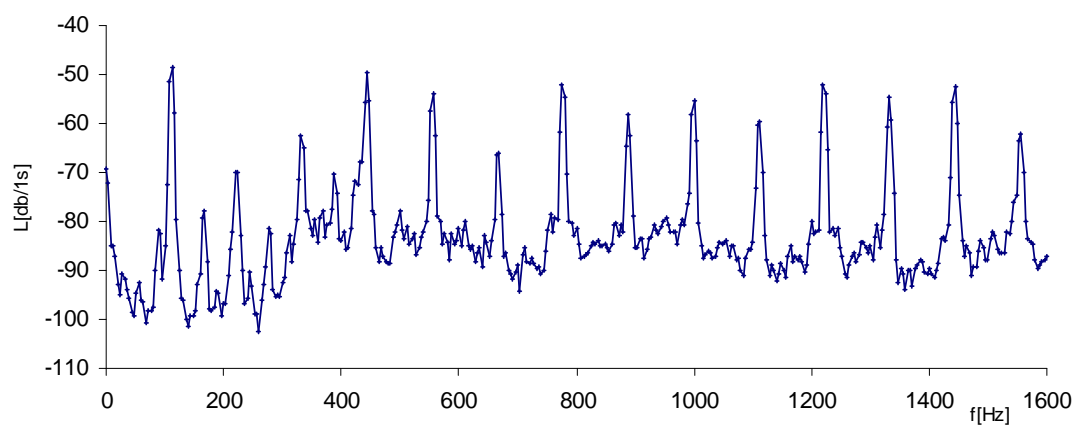
Obr. 63: Průběh 1. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)



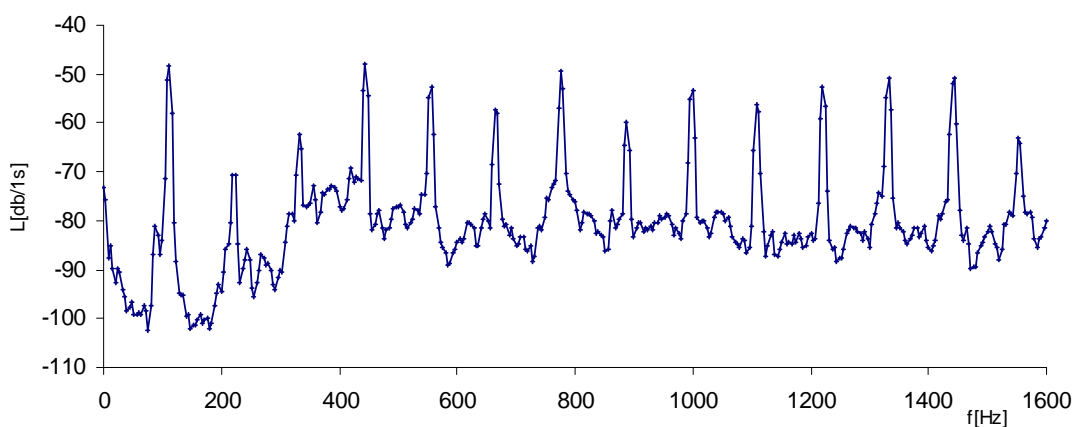
Obr. 64: Průběh 2. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)



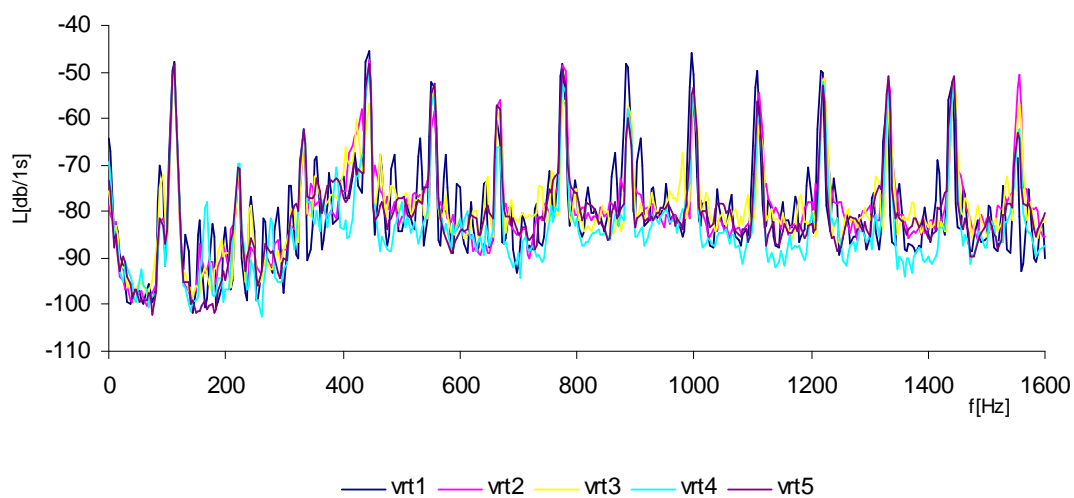
Obr. 65: Průběh 3. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)



Obr. 66: Průběh 4. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)



Obr. 67: Průběh 5. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)



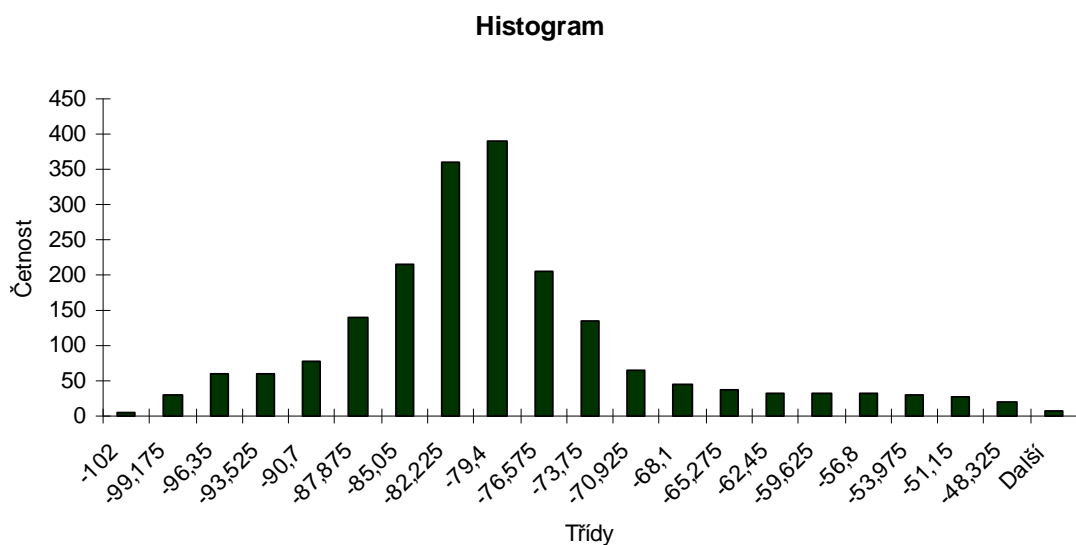
Obr. 68: Průběhy měřených spekter vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)

<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
vrtule1	401	-32158,3	-80,1953	116,1387
vrtule2	401	-31965,6	-79,7147	97,08411
vrtule3	401	-31901,4	-79,5546	84,90788
vrtule4	401	-33374	-83,2269	98,07897
vrtule5	401	-32290	-80,5237	100,4186

ANOVA

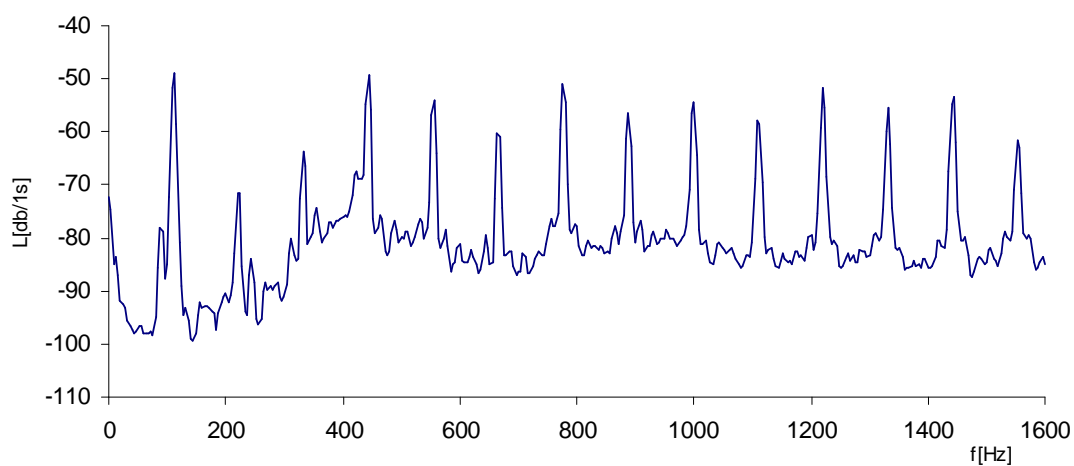
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	3584,023	4	896,0058	9,020892	3,212E-07	2,376377
Všechny výběry	198651,3	2000	99,32564			
Celkem	202235,3	2004				

Obr. 69: Statistická analýza naměřených spekter



Obr. 70: Histogram naměřených dat

Na zobrazených grafech je měření spektra motoru s dvojitým vyvážením zkrácené vrtulky. Z průběhu spektra je patrné zarušení průběhu a vznik dalších harmonických. Důvodem je převážení zkrácené vrtulky nadměrnou váhou protizávaží. Otáčky vrtulky zůstaly na hodnotě předchozího měření, tj. 112Hz (tj. 6720 ot/min). Společný graf ukazuje odlišnost jednotlivých měření, u kterých je vidět nadměrné nevyvážení spektra cca do 400Hz (4x). Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty pro všech pět provedených měření. Z hodnot průměrů a rozptylů pro jednotlivá měření vidíme minimální rozdíly. Z toho lze usuzovat, že měření jsou si podobná. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 99,32564. Směrodatná odchylka z toho činí 9,96. Tato hodnota je dostatečně malá, abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si navzájem podobné. Z hodnoty P, která je zde menší než zadaná hodnota α (5%), můžeme zamítnout nulovou hypotézu. Histogram má normální rozdělení.



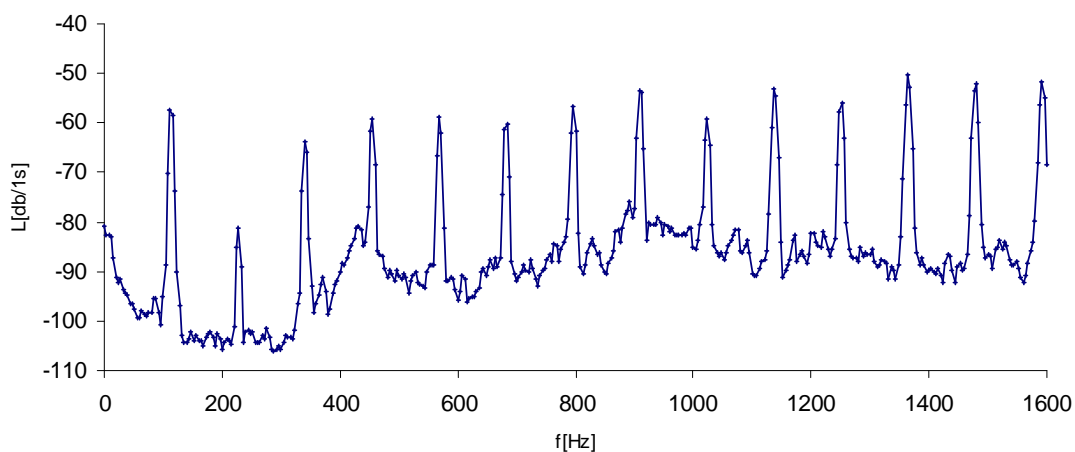
Obr. 71: Průměrný průběh spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)

6.2.5 Měření spektra motoru s malou deformací vrtulky s vyvážením (3)

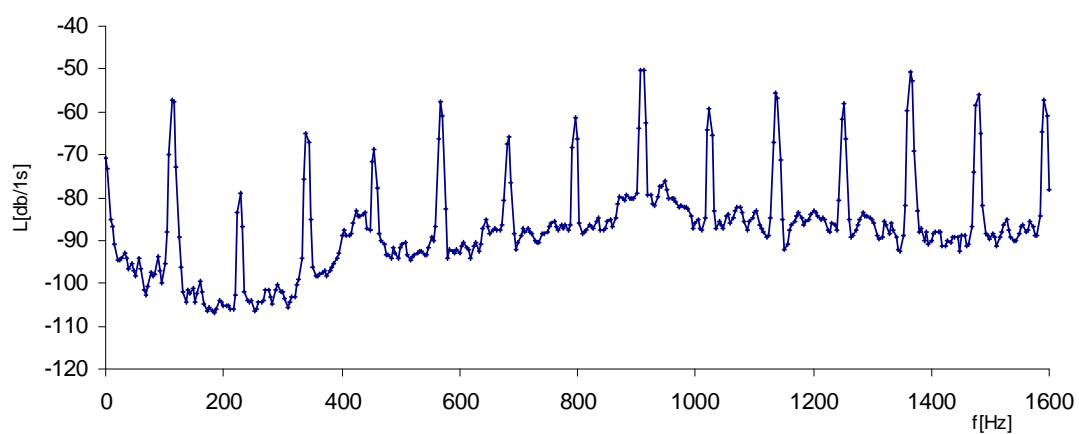
Nastavení PULSE:

- Lines 400
- Span 1600 Hz
- Overlap 66,67%
- Averaging Exponencial

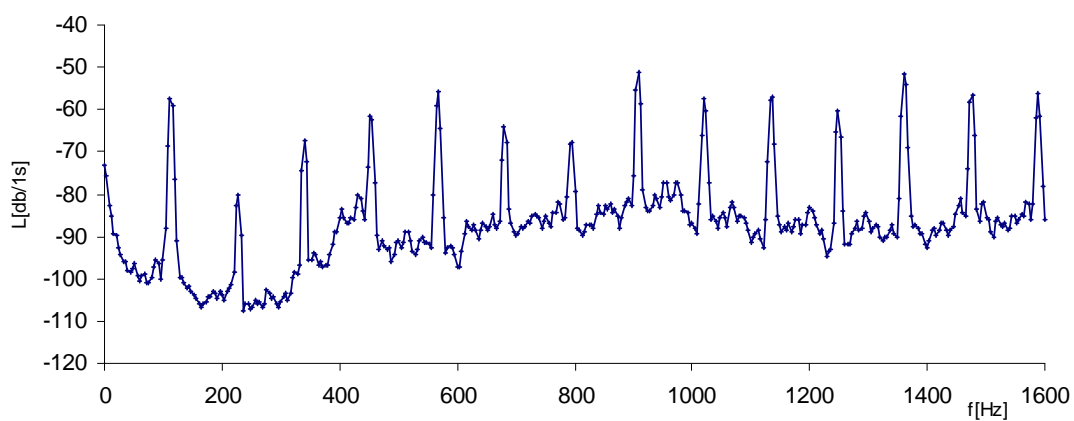
Výsledky měření upravené vrtulky



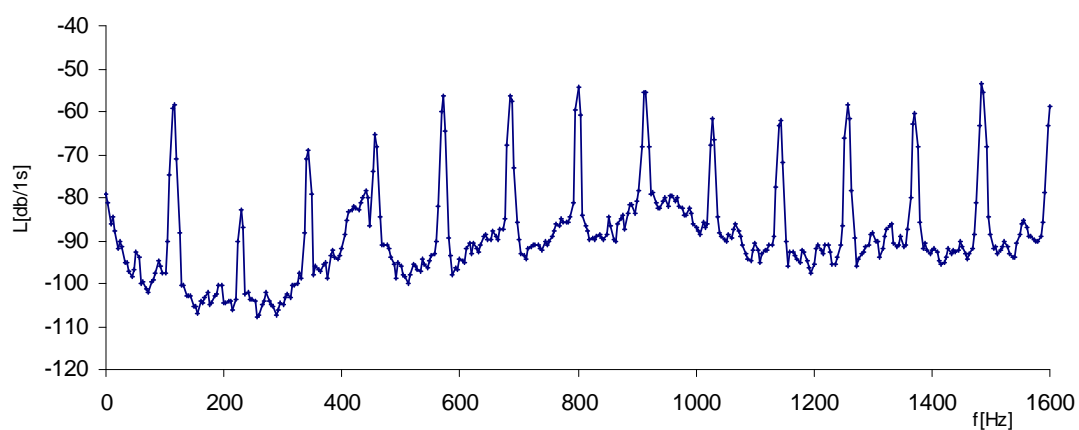
Obr. 72: Průběh 1. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)



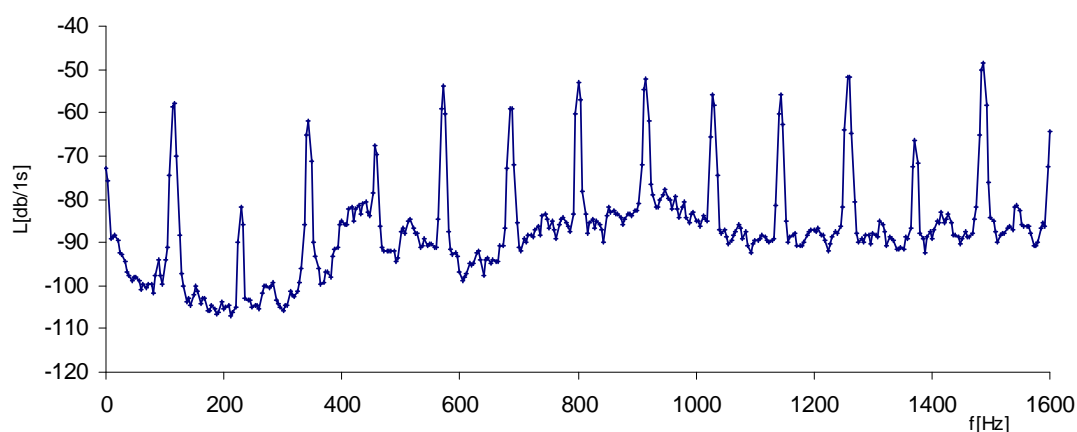
Obr. 73: Průběh 2. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)



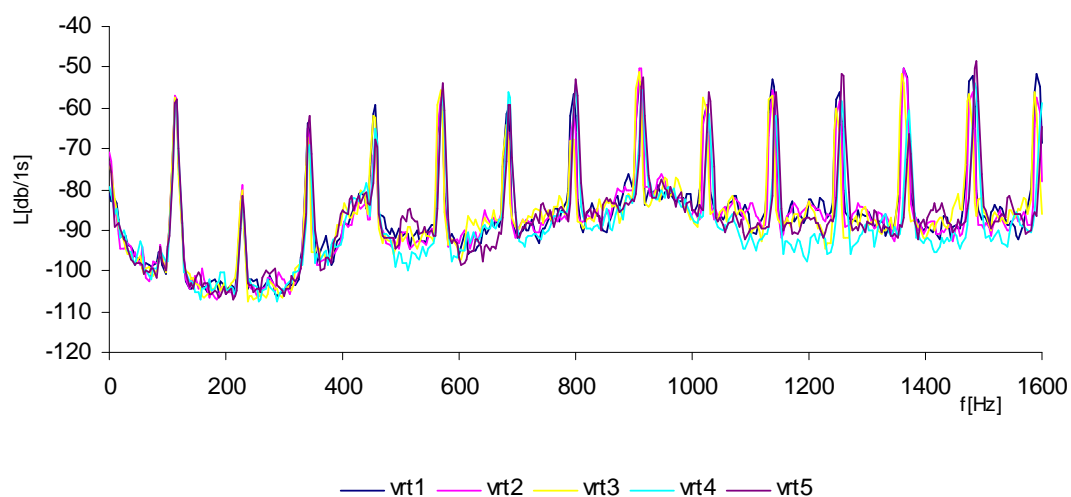
Obr. 74: Průběh 3. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)



Obr. 75: Průběh 4. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)



Obr. 76: Průběh 5. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)



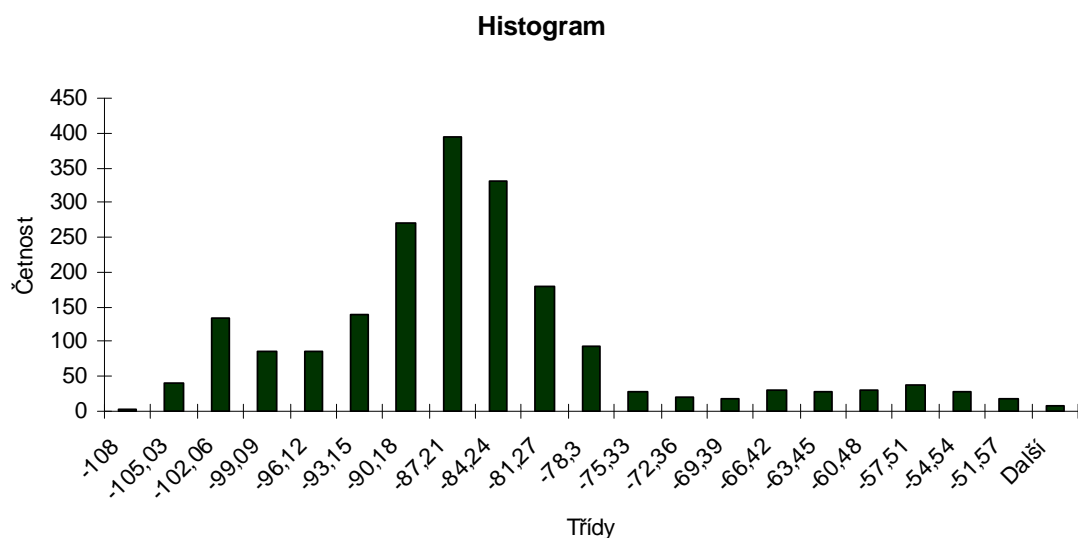
Obr. 77: Průběhy měřených spekter vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)

<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
vrtule1	401	-34645	-86,3965	134,2784
vrtule2	401	-34935,8	-87,1217	118,0119
vrtule3	401	-34933,5	-87,116	117,2668
vrtule4	401	-35664,4	-88,9387	116,7105
vrtule5	401	-34983,6	-87,2409	123,3286

ANOVA

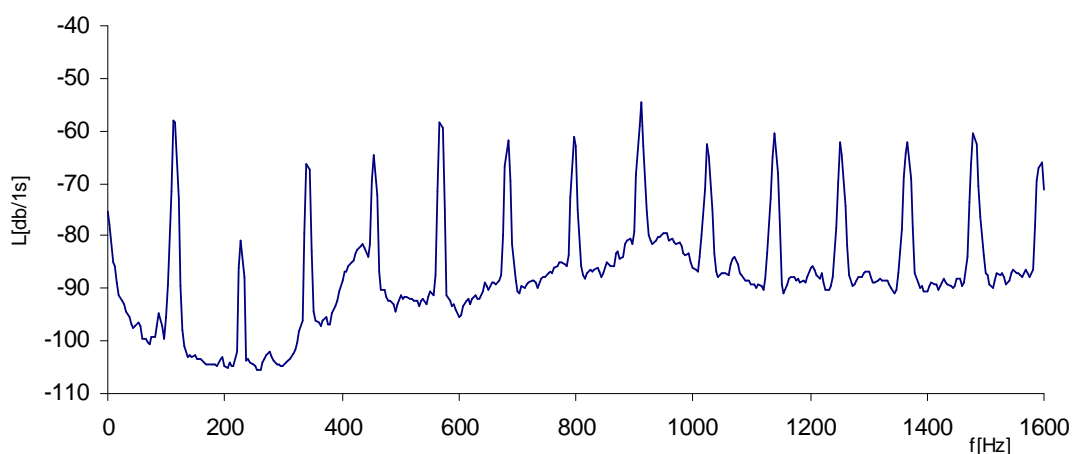
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	1423,933	4	355,9831	2,919827	0,0201429	2,376377
Všechny výběry	243838,5	2000	121,9192			
Celkem	245262,4	2004				

Obr. 78: Statistická analýza naměřených spekter



Obr. 79: Histogram naměřených dat

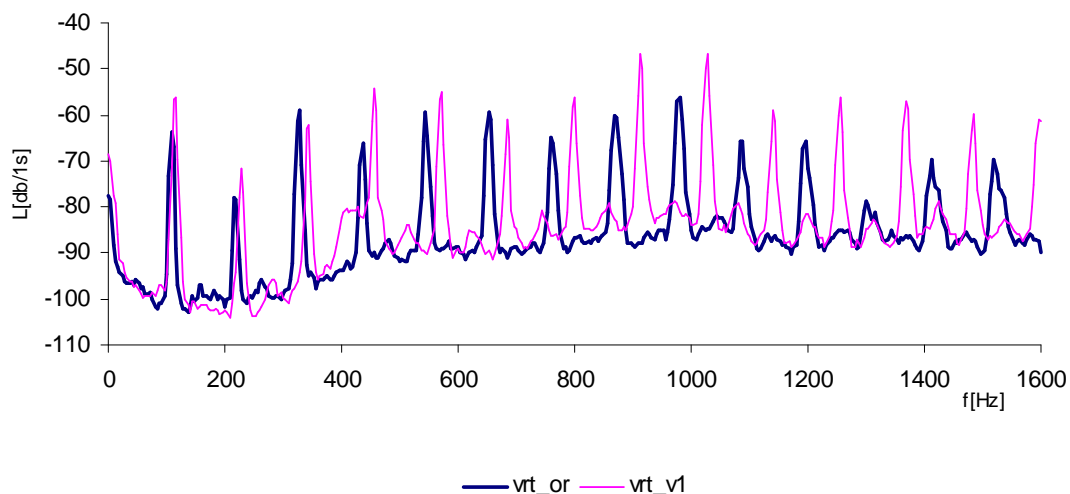
Na zobrazených grafech je měření spektra motoru s mezi vyvážením zkrácené vrtulky (tj. 1x1,5cm vyvážení plus polovina tohoto rozměru). Z průběhu spektrum je patrný pokles amplitud jednotlivých peaků, což naznačuje korektnější nastavení vyvážení než tomu bylo v předchozím měření. Otáčky vrtulky zůstaly na hodnotě 112Hz (tj. 6720 ot/min). Společný graf ukazuje odlišnost jednotlivých měření, u kterých je vidět mírné zvlnění spektra v oblasti cca 1200Hz (11x). Tuto chybu zaneslo čtvrté měření. Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty pro všech pět provedených měření. Z hodnot průměrů a rozptylů pro jednotlivá měření vidíme minimální rozdíly. Rozptyl u prvního a posledního měření však vykazuje zvýšení. Z toho lze usuzovat, že měření jsou si podobná. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 121,9192. Směrodatná odchylka z toho činí 11,04. Tato hodnota je dostatečně malá, abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si navzájem podobné. Z hodnoty P, která je zde menší než zadaná hodnota α (5%), můžeme zamítnout nulou hypotézu. Histogram má normální rozdělení s náznakem nesusouměrnosti jako záporné šikmosti.



Obr. 80: Průměrný průběh spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (malá deformace listu vrtulky)

Obrázek 80 reprezentuje průměrný průběh vyhodnocený jako aritmetický průměr všech naměřených spekter signálu.

6.2.6 Vyhodnocení vyvažování vrtulky s malou deformací



Obr. 81: Porovnání průměrného výsledku měření s původním

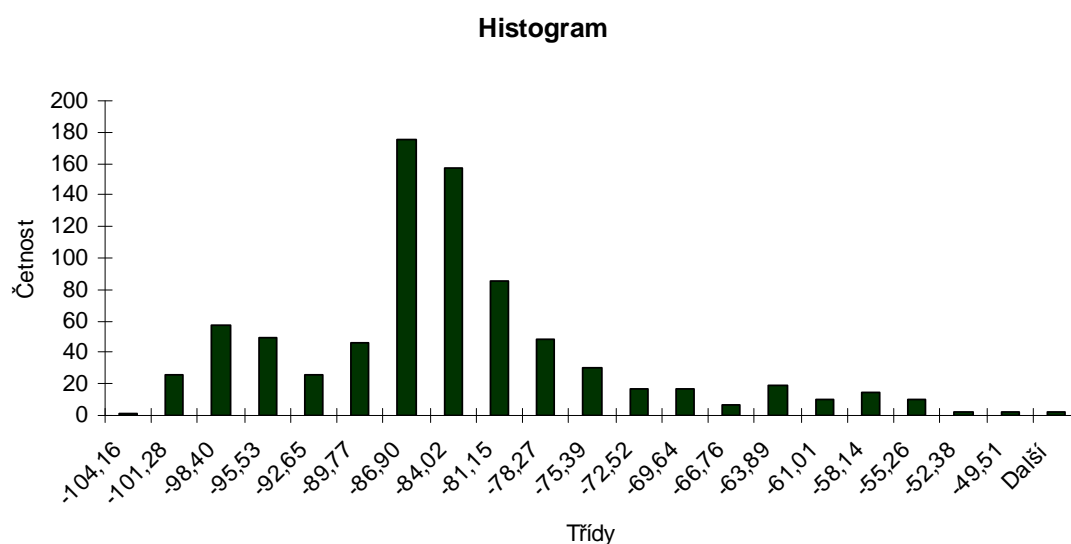
Obrázek 81 vyobrazuje srovnání původního měření vrtulky bez deformace (vrt_or) se zkrácenou vrtulkou s prvním vyvážením. Frekvence prvních harmonických zůstaly přibližně stejné, což odpovídá pouze mírnému zvýšení otáček. Další harmonické (2x, 3x, 4x ..) jsou již posunuty a s rostoucí frekvencí se více vzdalují od původních. Rovněž se při konci spektra zvýšily i amplitudy jednotlivých peaků. Vzrůst amplitud harmonických naznačuje dynamickou

neváženost působící na hřídel motorku (viz. kapitola 4). Následující graf a statistické vyhodnocení charakterizují míru odlišnosti obou průběhů.

<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
vtule_or	401	-34756,3	-86,6739	83,35105
vtule1	401	-33780,2	-84,2399	118,7978

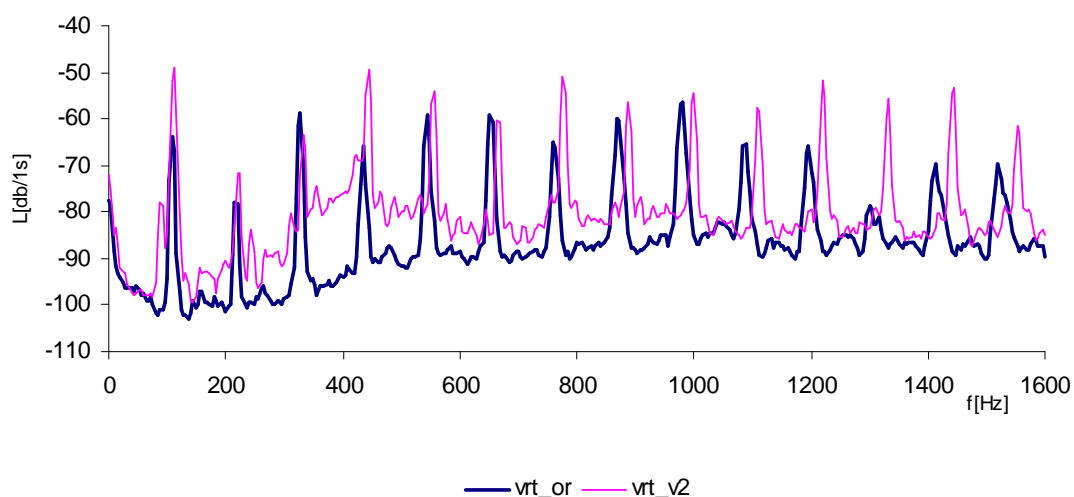
ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	1187,904	1	1187,904	11,75276	0,0006386	3,853109
Všechny výběry	80859,54	800	101,0744			
Celkem	82047,44	801				

Obr. 82: Statistická analýza naměřených spekter



Obr. 83: Histogram naměřených dat

Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty. Z hodnot průměrů pro jednotlivá měření vidíme minimální rozdíly. Rozptyl obou měření se však příliš neshoduje. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 101,0744. Směrodatná odchylka z toho činí 10,05. Tato hodnota je dostatečně malá, abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si navzájem podobné. Z hodnoty P, která je zde menší než zadaná hodnota α (5%), můžeme zamítnout nulovou hypotézu. Histogram má nesouměrné rozdělení s dvouvrcholovou charakteristikou.



Obr. 84: Porovnání průměrného výsledku měření s původním

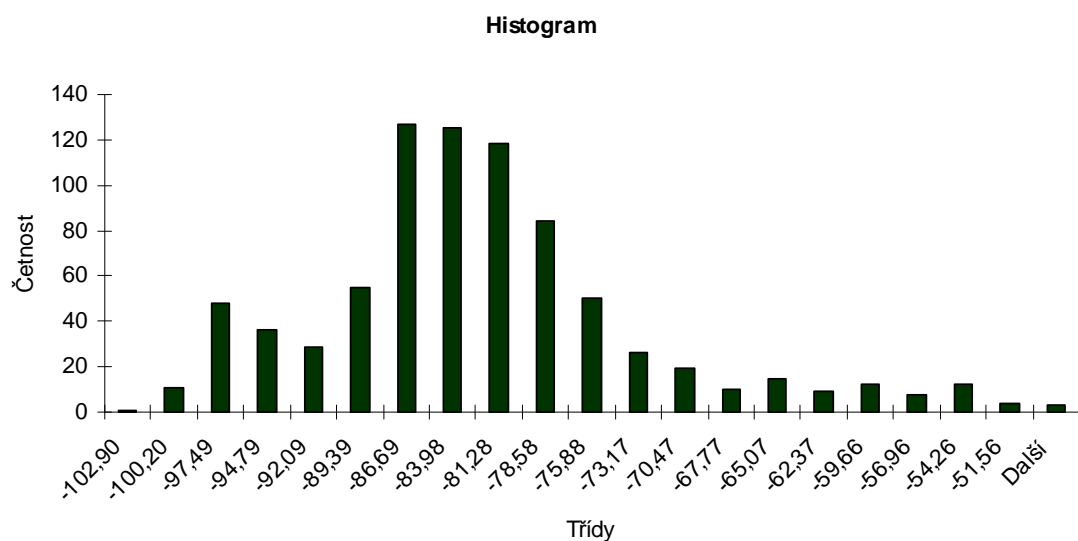
Obrázek 84 vyobrazuje srovnání původního měření vrtulky bez deformace se zkrácenou vrtulkou s dvojitým vyvážením. Je zde opět patrný nárůst amplitud harmonických při konci spektra což by mohlo souviset s nevyvážeností vrtulky na hřídel motorku, resp. převážení, jež lze pozorovat jako zvednutí průběhu spektra od původního průběhu vyvážené vrtulky. Následující graf a statistické vyhodnocení charakterizují míru odlišnosti obou průběhů.

<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
vtule_or	401	-34756,3	-86,6739	83,35105
vtule2	401	-32338,1	-80,6437	85,91746

ANOVA

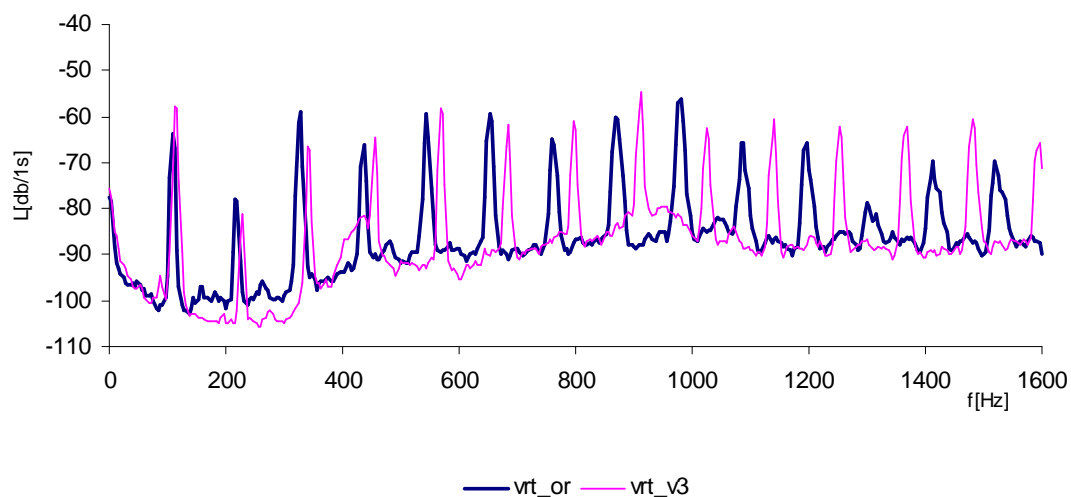
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	7290,98	1	7290,98	86,14692	1,532E-19	3,853109
Všechny výběry	67707,41	800	84,63426			
Celkem	74998,39	801				

Obr. 85: Statistická analýza naměřených spekter



Obr. 86: Histogram naměřených dat

Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty. Z hodnot průměrů a rozptylů pro jednotlivá měření vidíme již minimální rozdíly oproti minulému srovnání. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 84,63426. Směrodatná odchylka z toho činí 9,199. Tato hodnota je dostatečně malá, abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si navzájem podobné. Z hodnoty P, která je zde menší než zadaná hodnota α (5%), můžeme zamítnout nulovou hypotézu. Histogram má normální rozdělení s náznakem nesouměrnosti jako záporné šikmosti.



Obr. 87: Porovnání průměrného výsledku měření s původním

Obrázek 87 vyobrazuje srovnání původního měření vrtulky bez deformace se zkrácenou vrtulkou s korektnějším (3) vyvážením. Amplitudový nárůst harmonických již není tak značný což vede k názoru, že poslední vyvážení konce deformované vrtulky přibližně odpovídá

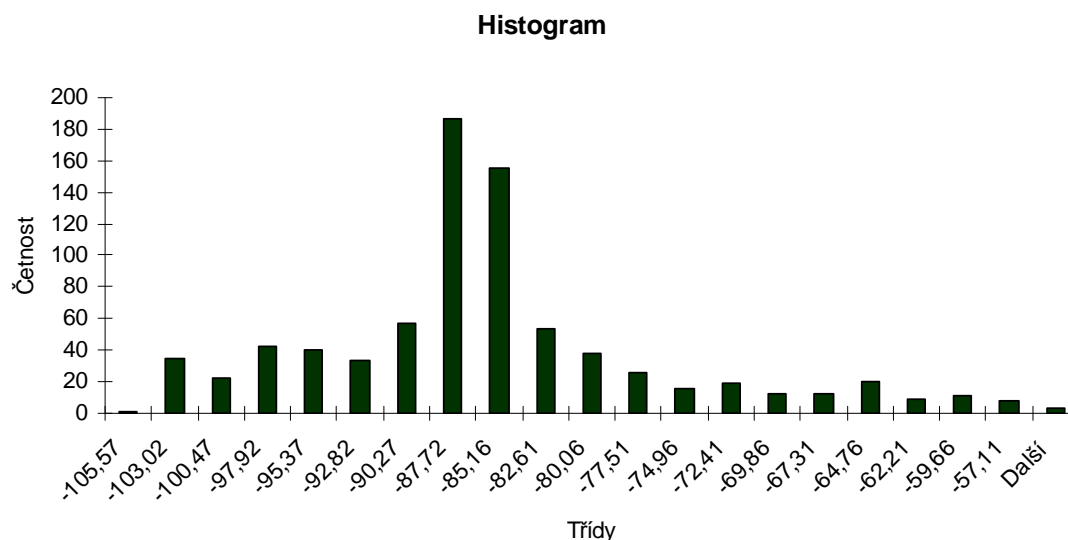
původnímu spektru měřenému na neupravené vrtulce. Následující graf a statistické vyhodnocení charakterizují míru odlišnosti obou průběhů.

<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
vrtule_or	401	-34756,3	-86,6739	83,35105
vrtule3	401	-35032,8	-87,3636	104,8368

ANOVA

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	95,36113	1	95,36113	1,013467	0,314378	3,853109
Všechny výběry	75275,14	800	94,09393			
Celkem	75370,5	801				

Obr. 88: Statistická analýza naměřených spekter



Obr. 89: Histogram naměřených dat

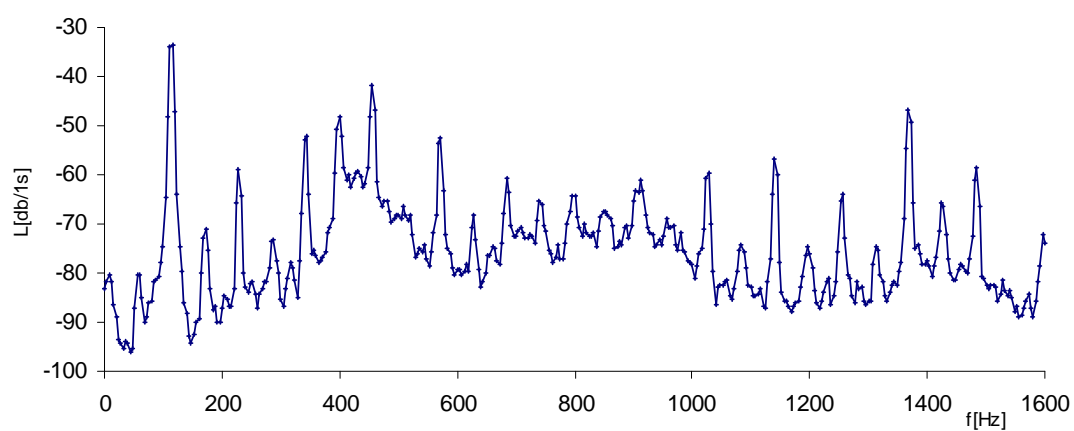
Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty pro všech pět provedených měření. Z hodnot průměrů pro jednotlivá měření vidíme minimální rozdíly. Rozptyl obou měření se však příliš neshoduje. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 94,09393. Směrodatná odchylka z toho činí 9,7. Tato hodnota je dostatečně malá, abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si navzájem podobné. Z hodnoty P, která je zde větší než zadaná hodnota α (5%), můžeme naopak potvrdit nulou hypotézu. Histogram má normální rozdělení.

6.2.7 Měření spektra motoru s velkou deformací vrtulky

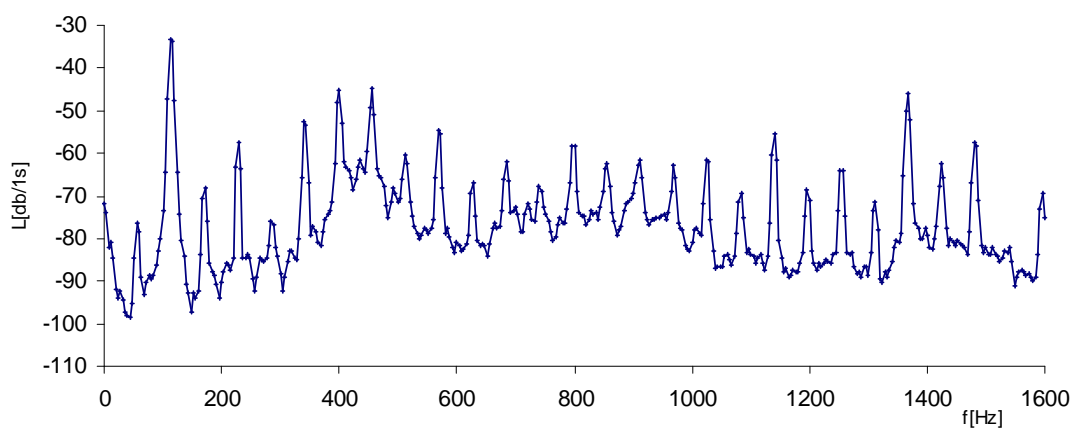
Nastavení PULSE:

- Lines 400
- Span 1600 Hz
- Overlap 66,67%
- Averaging Exponencial

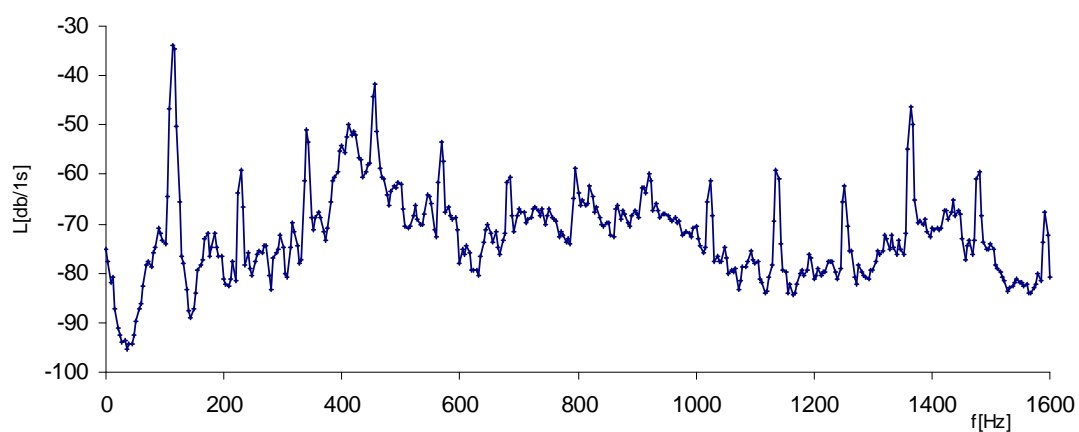
Výsledky měření upravené vrtulky



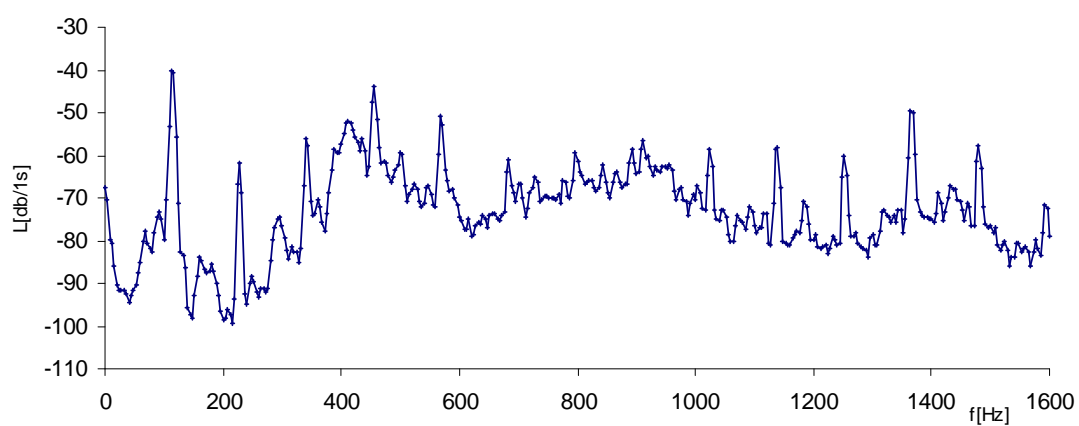
Obr. 90: Průběh 1. měření spektra vibrací motoru vrtulky (velká deformace listu vrtulky)



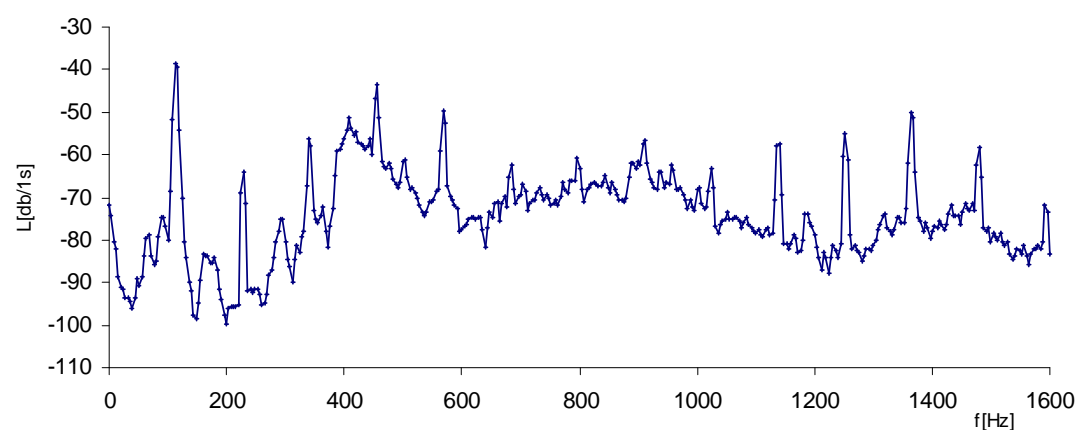
Obr. 91: Průběh 2. měření spektra vibrací motoru vrtulky (velká deformace listu vrtulky)



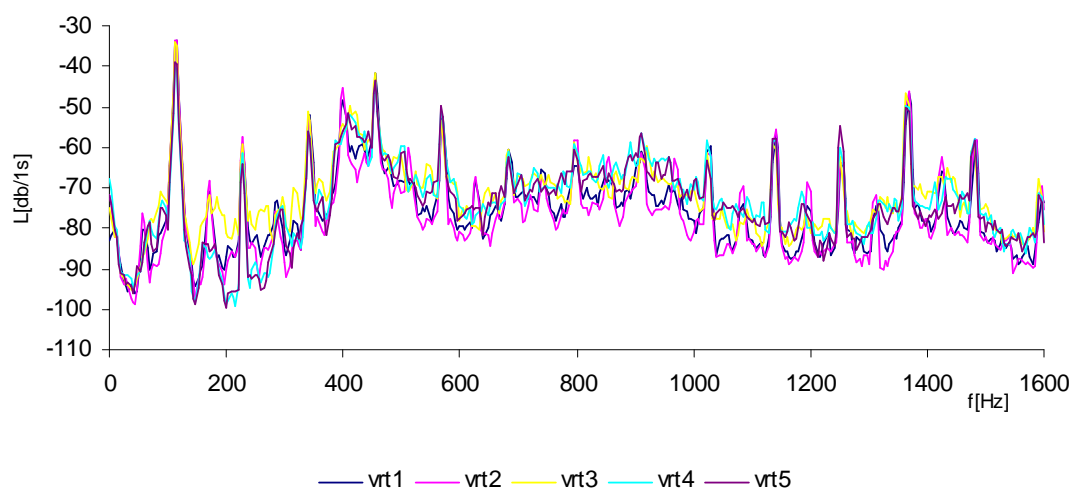
Obr. 92: Průběh 3. měření spektra vibrací motoru vrtulky (velká deformace listu vrtulky)



Obr. 93: Průběh 4. měření spektra vibrací motoru vrtulky (velká deformace listu vrtulky)



Obr. 94: Průběh 5. měření spektra vibrací motoru vrtulky (velká deformace listu vrtulky)



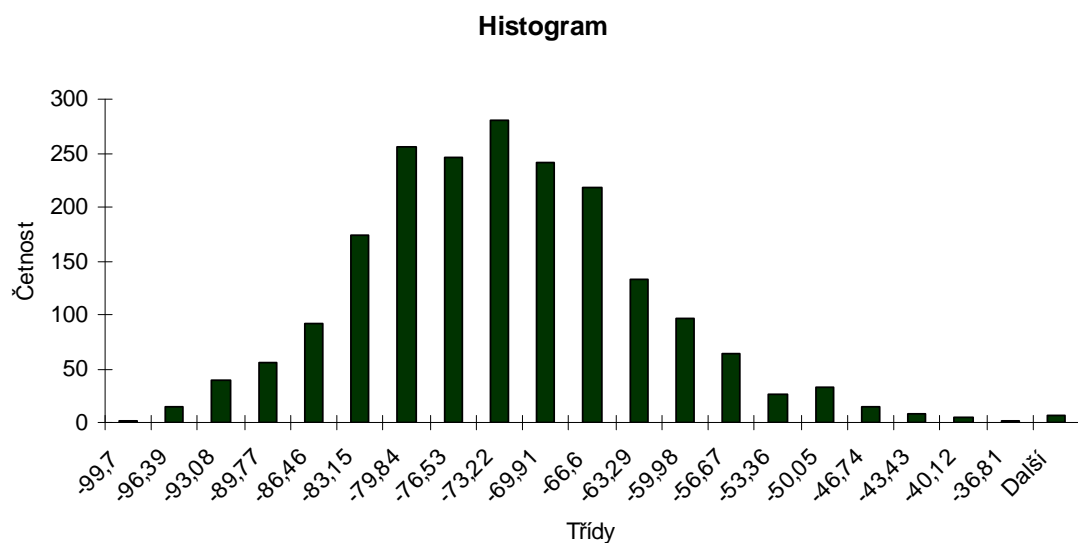
Obr. 95: Průběhy měřených spekter vibrací motoru vrtulky (velká deformace listu vrtulky)

<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
vrtule1	401	-30346,1	-75,6761	99,10293
vrtule2	401	-30909,5	-77,081	111,0251
vrtule3	401	-28934,9	-72,1569	81,87586
vrtule4	401	-29357,3	-73,2102	106,6138
vrtule5	401	-29741,3	-74,1678	107,4696

ANOVA

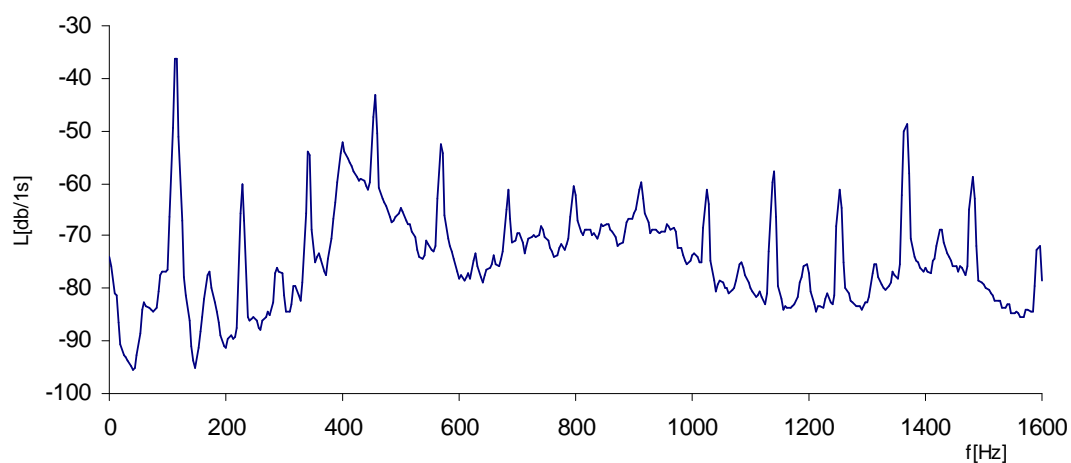
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	6135,478	4	1533,87	15,1542	3,28E-12	2,376377
Všechny výběry	202434,9	2000	101,2175			
Celkem	208570,4	2004				

Obr. 96: Statistická analýza naměřených spekter



Obr. 97: Histogram naměřených dat

Na zobrazených grafech je měření spektra motoru s velkým zkrácením vrtulky (deformovaný list vrtulky má nyní 3,5cm). Z průběhu spektra je patrné kolísání celého průběhu oproti původnímu spektru vrtulky a jeho celkový postup v ose y. Tento zdvih by mohl být určujícím znakem uvolnění vlivem silného nevyvážení. Společný graf ukazuje odlišnost jednotlivých měření. Největší chybu zaneslo třetí měření. Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty pro všech pět provedených měření. Z hodnot průměrů a rozptylů pro jednotlivá měření vidíme minimální rozdíly. Rozptyl a průměr u třetího měření však vykazují pokles. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 101,2175. Směrodatná odchylka z toho činí 10,06. Tato hodnota je dostatečně malá, abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si navzájem podobné. Z hodnoty P, která je zde menší než zadaná hodnota α (5%), můžeme zamítnout nulovou hypotézu. Histogram má normální rozdělení.



Obr. 98: Průměrný průběh spektra vibrací motoru vrtulky (velká deformace listu vrtulky)

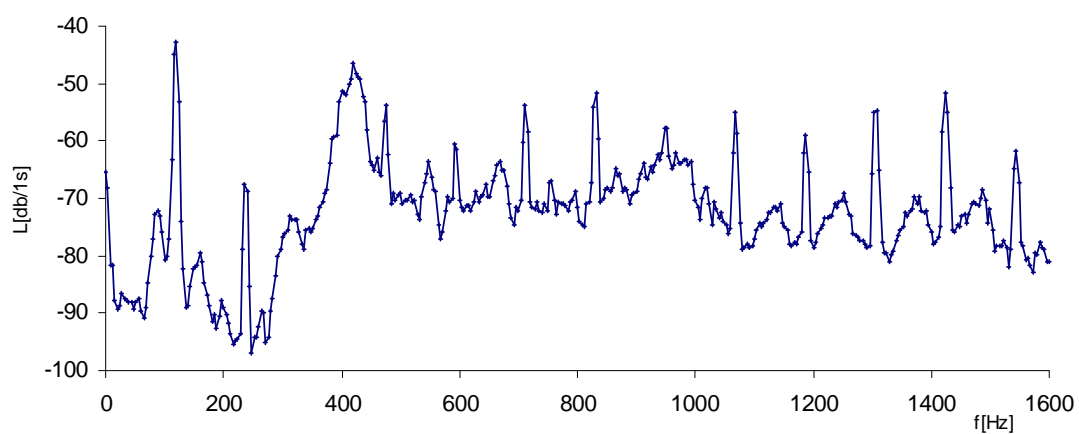
Obrázek 98 reprezentuje průměrný průběh vyhodnocený jako aritmetický průměr všech naměřených spekter signálu.

6.2.8 Měření spektra motoru s velkou deformací vrtulky s vyvážením (1)

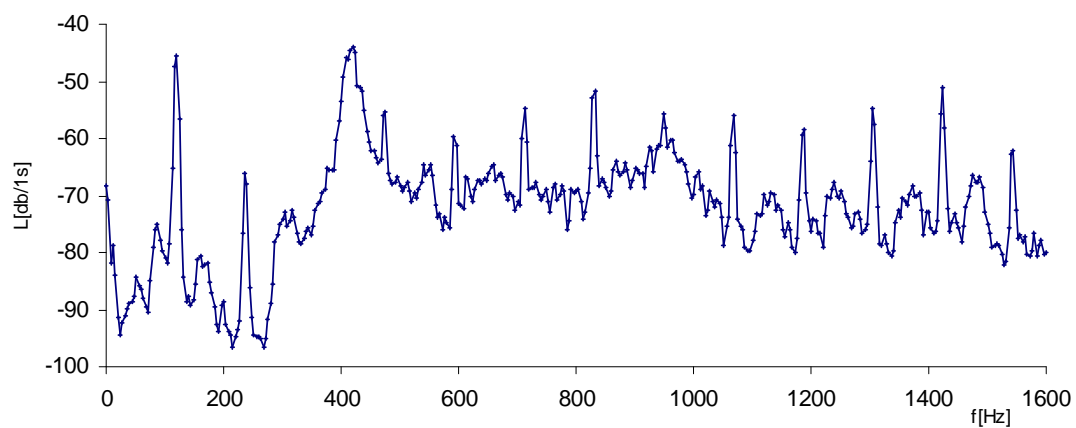
Nastavení PULSE:

- Lines 400
- Span 1600 Hz
- Overlap 66,67%
- Averaging Exponencial

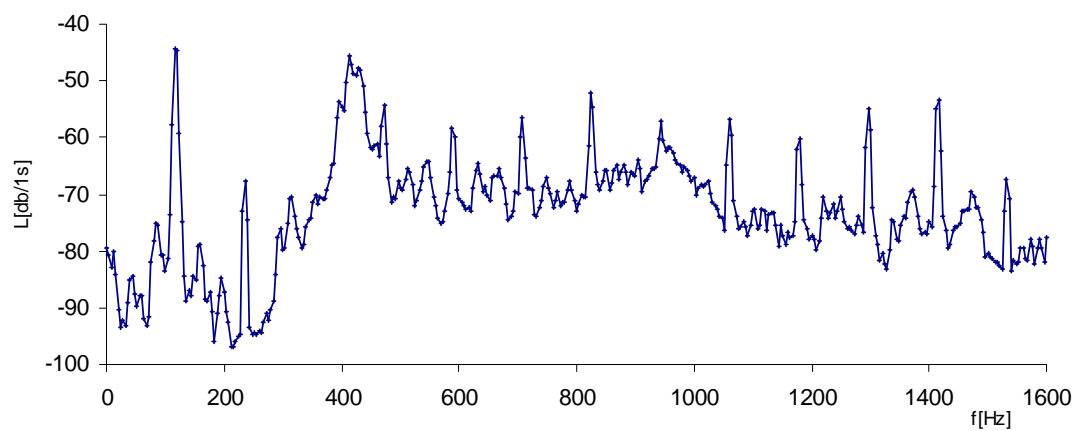
Výsledky měření upravené vrtulky



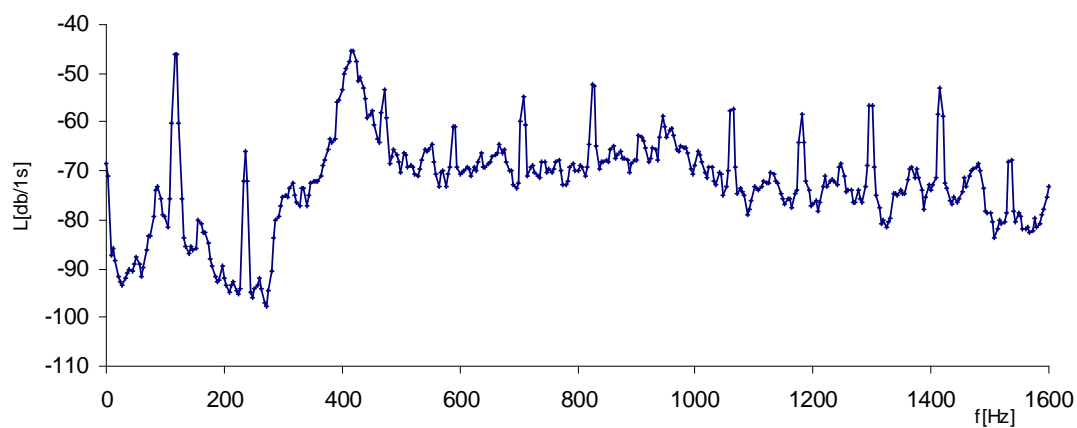
Obr. 99: Průběh 1. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)



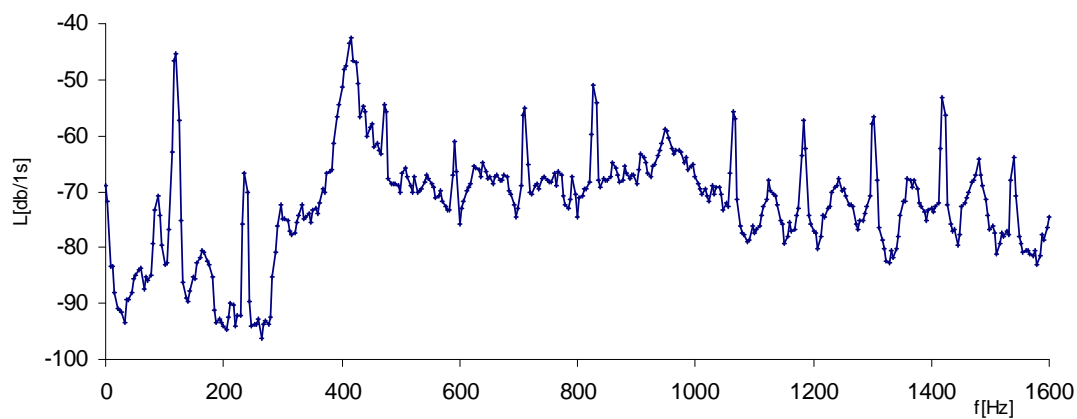
Obr. 100: Průběh 2. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)



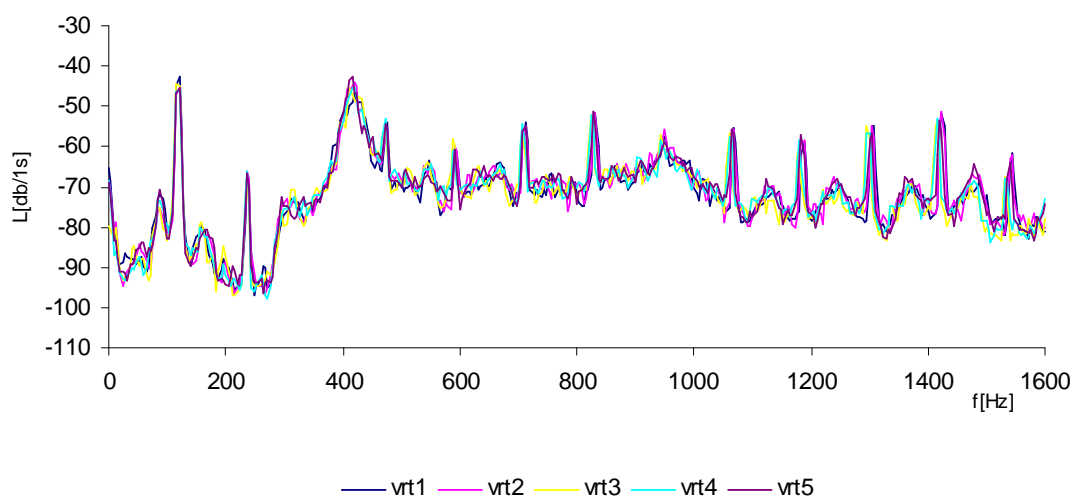
Obr. 101: Průběh 3. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)



Obr. 102: Průběh 4. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)



Obr. 103: Průběh 5. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)



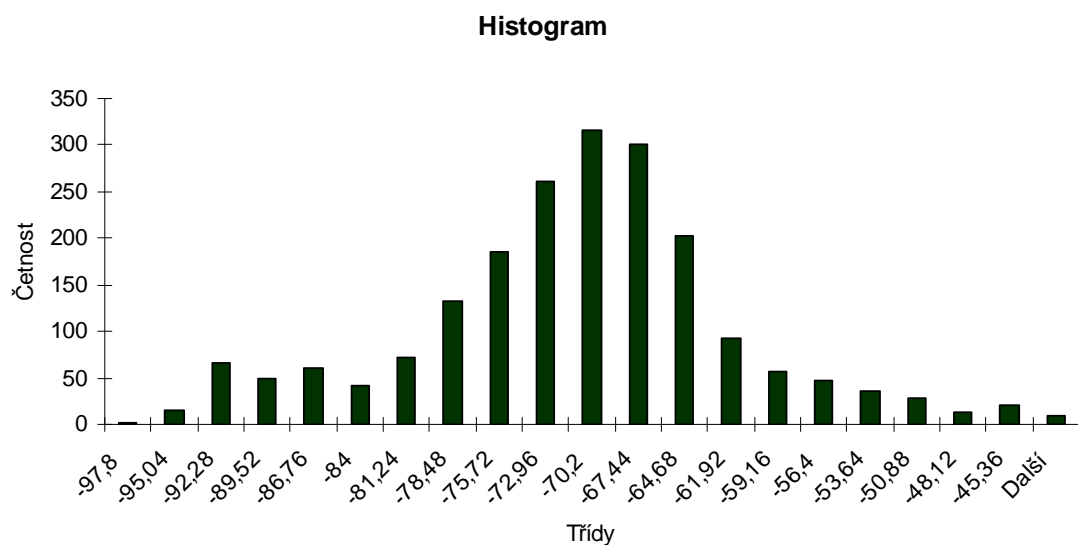
Obr. 104: Průběhy měřených spekter vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)

<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
vrtule1	401	-29078,6	-72,5152	89,97214
vrtule2	401	-28947,3	-72,1878	93,92823
vrtule3	401	-29260,5	-72,9688	94,9992
vrtule4	401	-29043,2	-72,4269	93,71527
vrtule5	401	-28920,2	-72,1202	92,09852

ANOVA

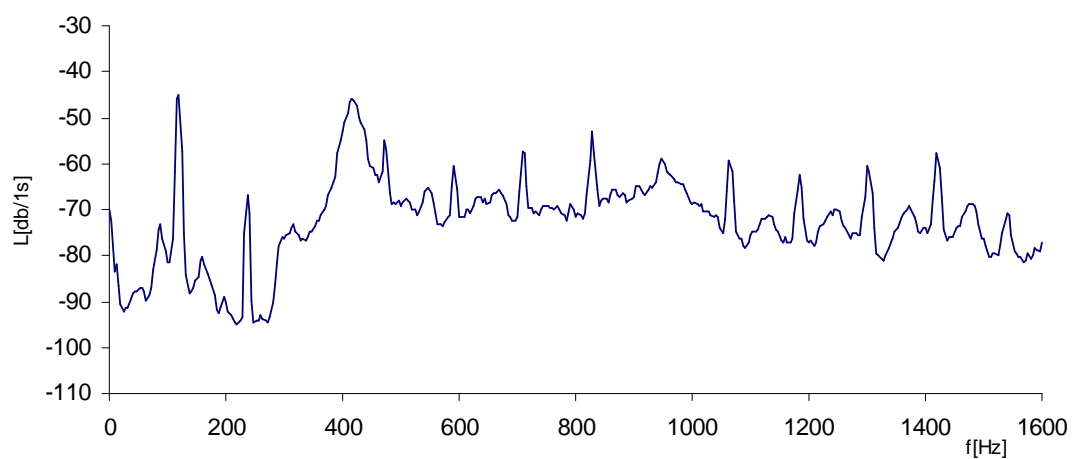
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	180,972	4	45,243	0,486784	0,7454769	2,376377
Všechny výběry	185885,3	2000	92,94267			
Celkem	186066,3	2004				

Obr. 105: Statistická analýza naměřených spekter



Obr. 106: Histogram naměřených dat

Na zobrazených grafech je měření spektra motoru s velkým zkrácením vrtulky s prvním vyvážením. Z průběhu spektra je patrné snížení amplitudy jednotlivých harmonických i jejich výraznějšího projevu. To by naznačovalo správný postup pro další vyvažování. Otáčky vrtulky jsou na hodnotě 116Hz (tj. 6960 ot/min). Společný graf ukazuje odlišnost jednotlivých měření. Jednotlivé průběhy měření jsou si velmi podobné, proto nelze určit nejchybnější měření. Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty pro všech pět provedených měření. Z hodnot průměrů a rozptylů pro jednotlivá měření vidíme minimální rozdíly. Rozptyl a průměr u třetího měření však vykazují pokles. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 92,94267. Směrodatná odchylka z toho činí 9,64. Tato hodnota je dostatečně malá, abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si navzájem podobné. Z hodnoty P, která je zde větší než zadaná hodnota α (5%), můžeme potvrdit nulou hypotézu, tudíž měření jsou shodná. Histogram má normální rozdělení s malou zápornou nesouměrností.



Obr. 107: Průměrný průběh spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)

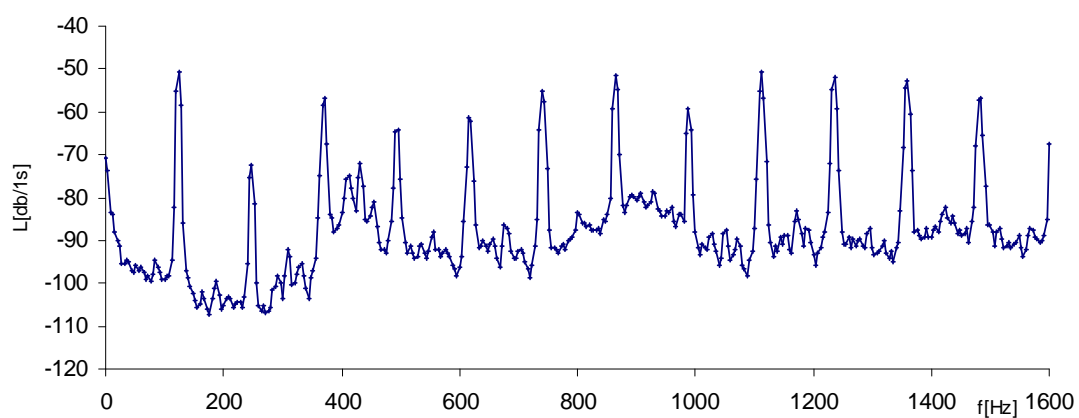
Obrázek 107 reprezentuje průměrný průběh vyhodnocený jako aritmetický průměr všech naměřených spekter signálu.

6.2.9 Měření spektra motoru s velkou deformací vrtulky s vyvážením (2)

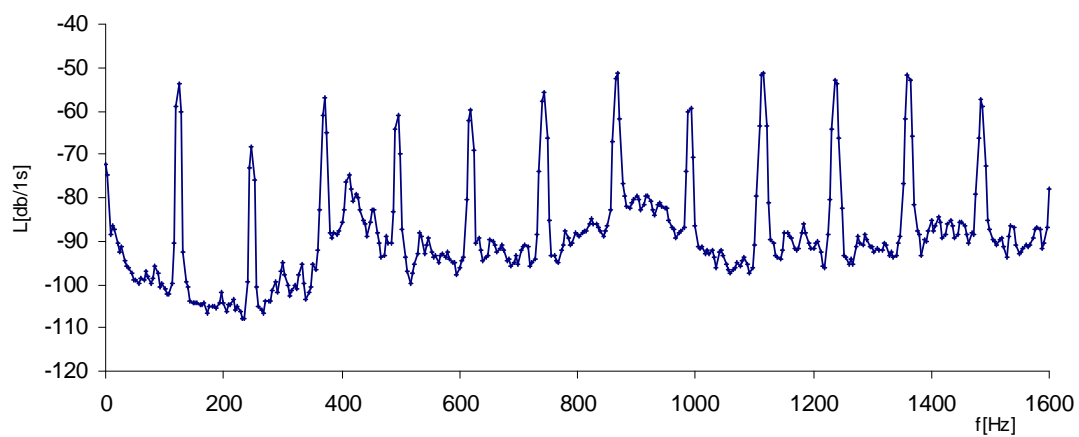
Nastavení PULSE:

- Lines 400
- Span 1600 Hz
- Overlap 66,67%
- Averaging Exponencial

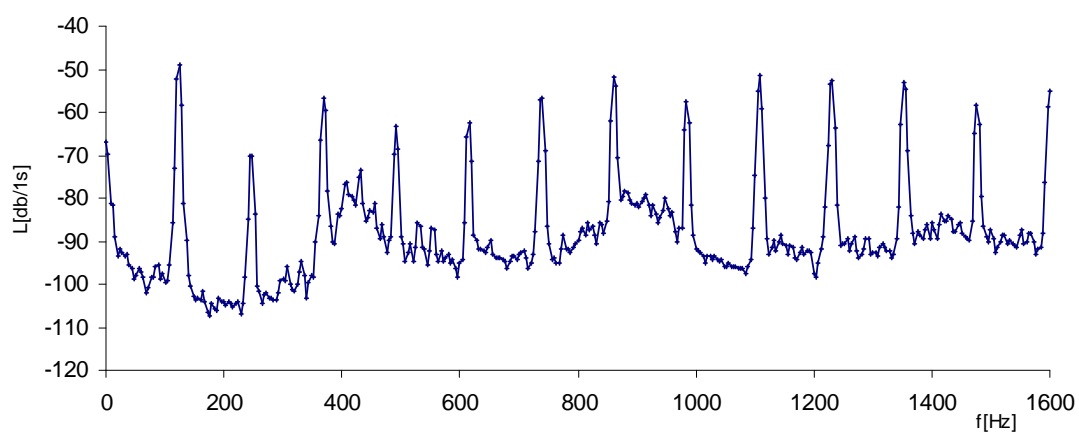
Výsledky měření upravené vrtulky



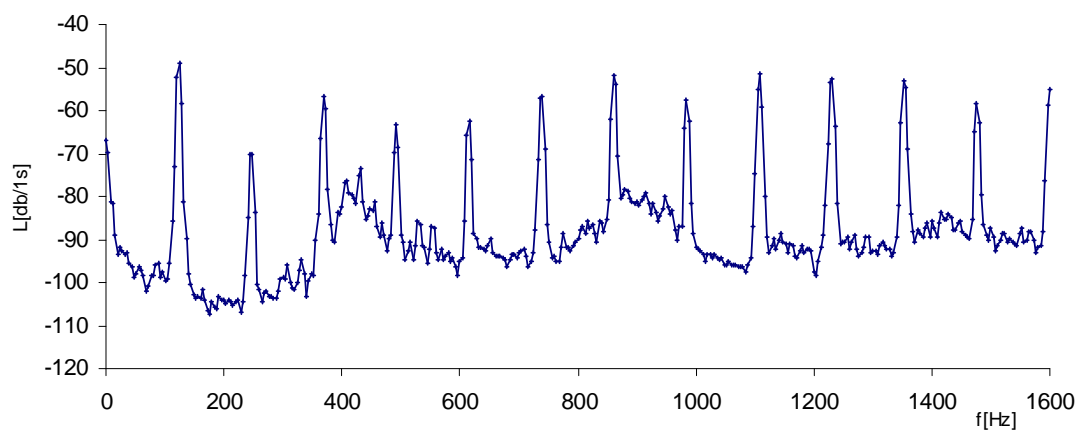
Obr. 108: Průběh 1. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)



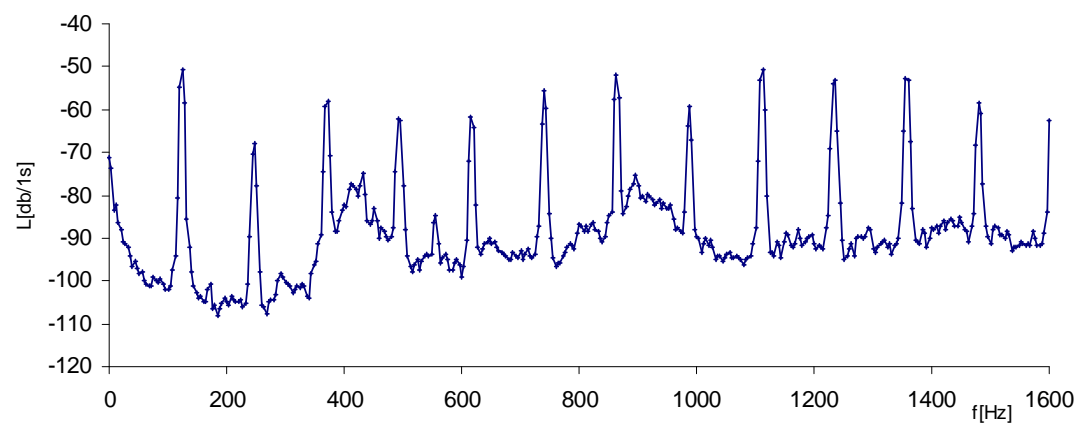
Obr. 109: Průběh 2. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)



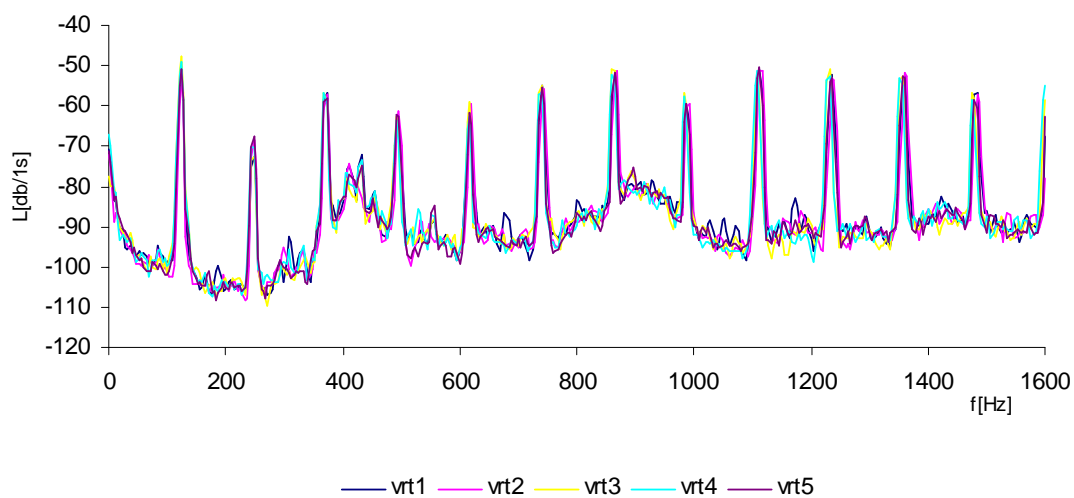
Obr. 110: Průběh 3. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)



Obr. 111: Průběh 4. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)



Obr. 112: Průběh 5. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)



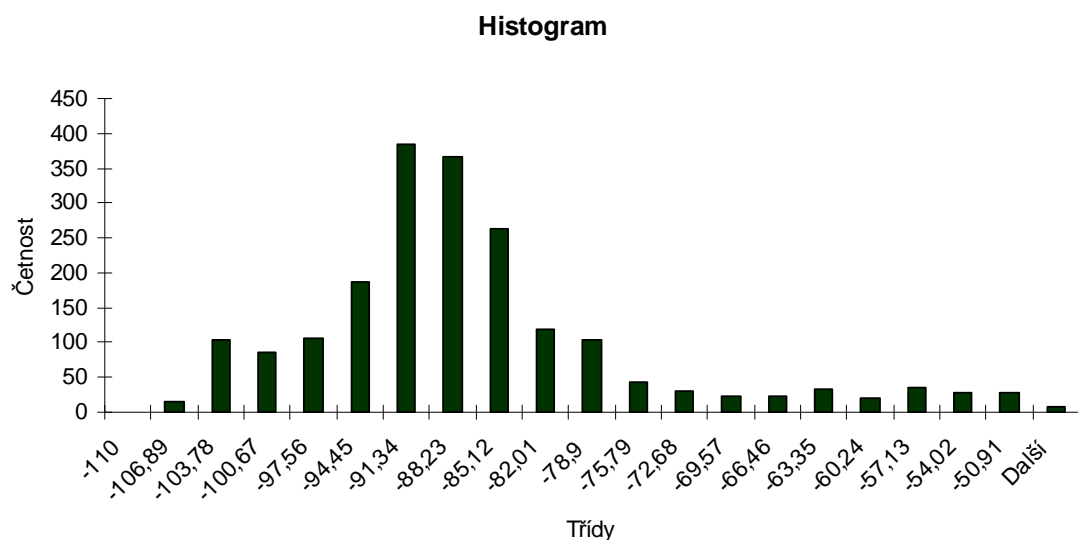
Obr. 113: Průběhy měřených spekter vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)

<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
vrtule1	401	-35139,8	-87,6304	128,02
vrtule2	401	-35512,6	-88,5601	130,9211
vrtule3	401	-35416	-88,3192	132,0285
vrtule4	401	-35340,8	-88,1317	130,2898
vrtule5	401	-35522,1	-88,5838	128,6562

ANOVA

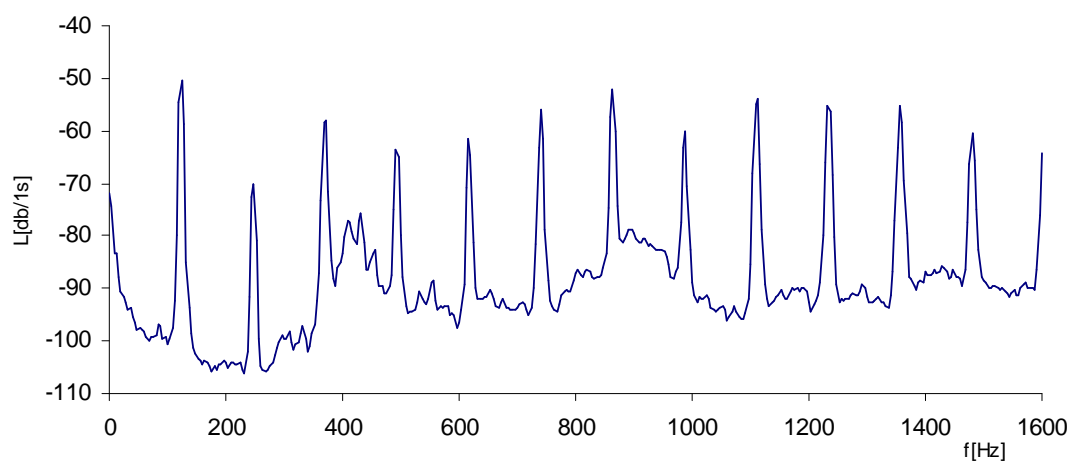
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	244,6581	4	61,16453	0,470558	0,7573983	2,376377
Všechny výběry	259966,2	2000	129,9831			
Celkem	260210,8	2004				

Obr. 114: Statistická analýza naměřených spekter



Obr. 115: Histogram naměřených dat

Na zobrazených grafech je měření spektra motoru s velkým zkrácením vrtulky s druhým vyvážením. Průběh spektra je již teď podobný původnímu měření vrtulky pouze s rozdílnou amplitudou jednotlivých harmonických. Oproti měření s jedním vyvážením lze pozorovat výrazné definování jednotlivých harmonických v celém rozsahu spektra, což naznačuje správný postup vyvažování. Otáčky vrtulky jsou na hodnotě 116Hz (tj. 6960 ot/min). Společný graf ukazuje odlišnost jednotlivých měření. Jednotlivé průběhy měření jsou si velmi podobné, proto nelze určit nejvhodnější měření. Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty pro všech pět provedených měření. Z hodnot průměrů a rozptylů pro jednotlivá měření vidíme minimální rozdíly. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 129,9831. Směrodatná odchylka z toho činí 11,4. Tato hodnota je dostatečně malá, abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si navzájem podobné. Z hodnoty P, která je zde větší než zadaná hodnota α (5%), můžeme potvrdit nulou hypotézu, tudíž měření jsou shodná. Histogram má normální rozdělení.



Obr. 116: Průměrný průběh spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)

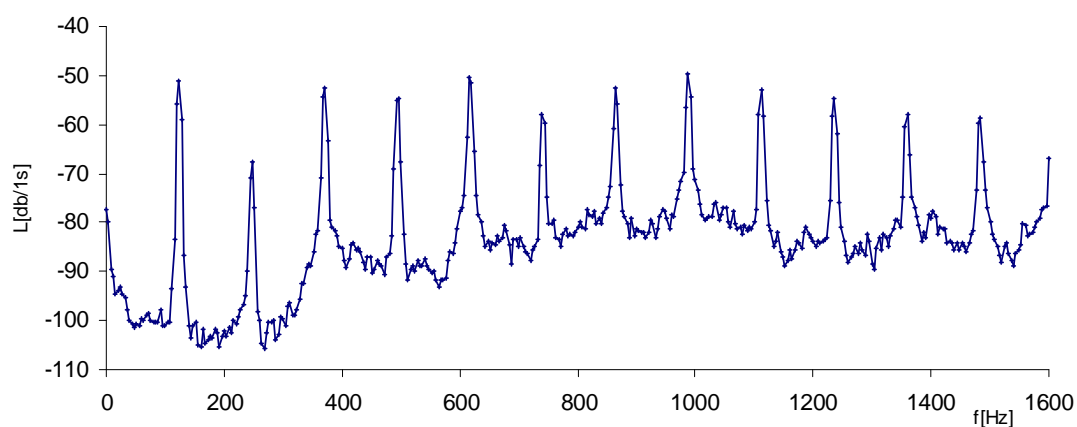
Obrázek 116 reprezentuje průměrný průběh vyhodnocený jako aritmetický průměr všech naměřených spekter signálu.

6.2.10 Měření spektra motoru s velkou deformací vrtulky s vyvážením (3)

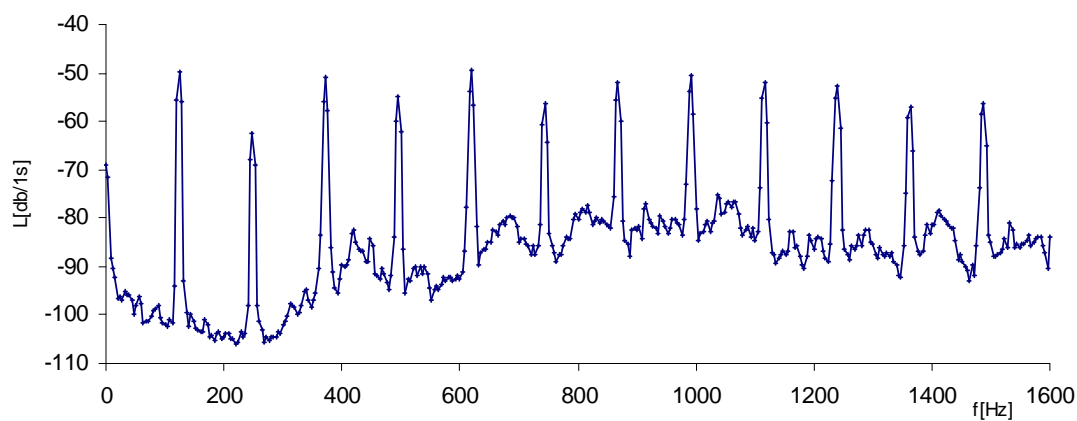
Nastavení PULSE:

- Lines 400
- Span 1600 Hz
- Overlap 66,67%
- Averaging Exponencial

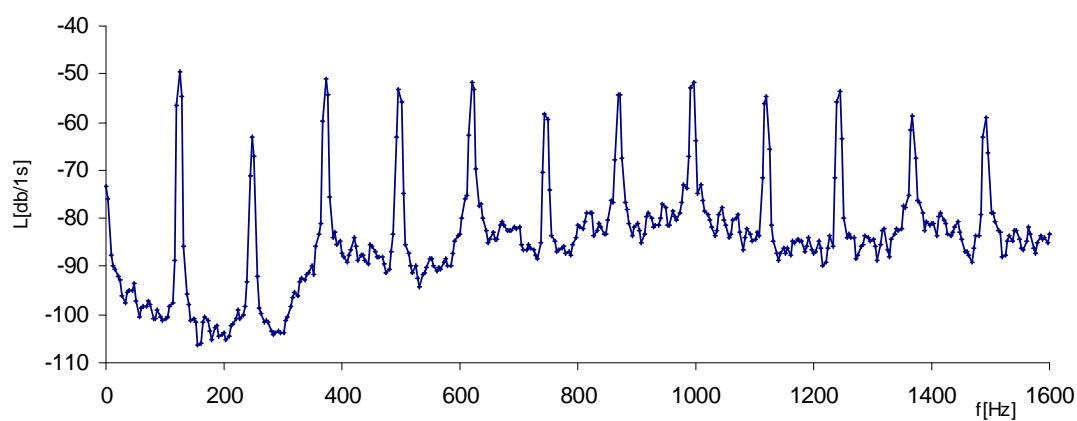
Výsledky měření upravené vrtulky



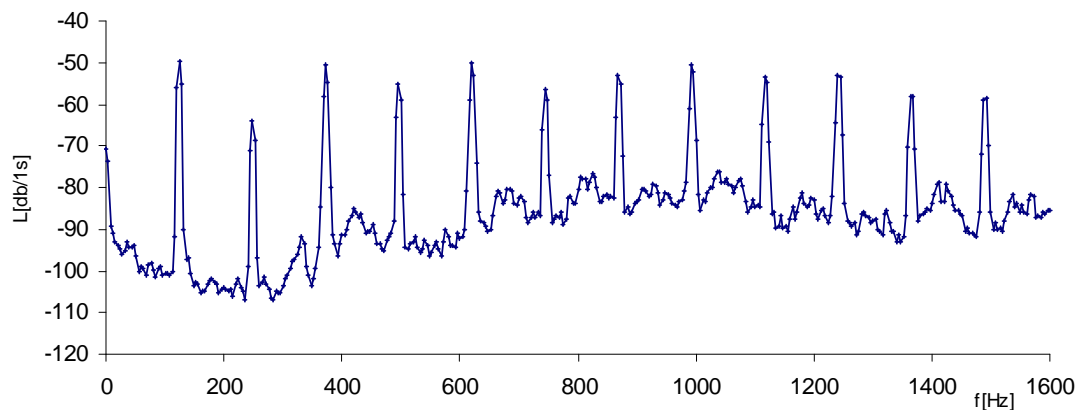
Obr. 117: Průběh 1. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)



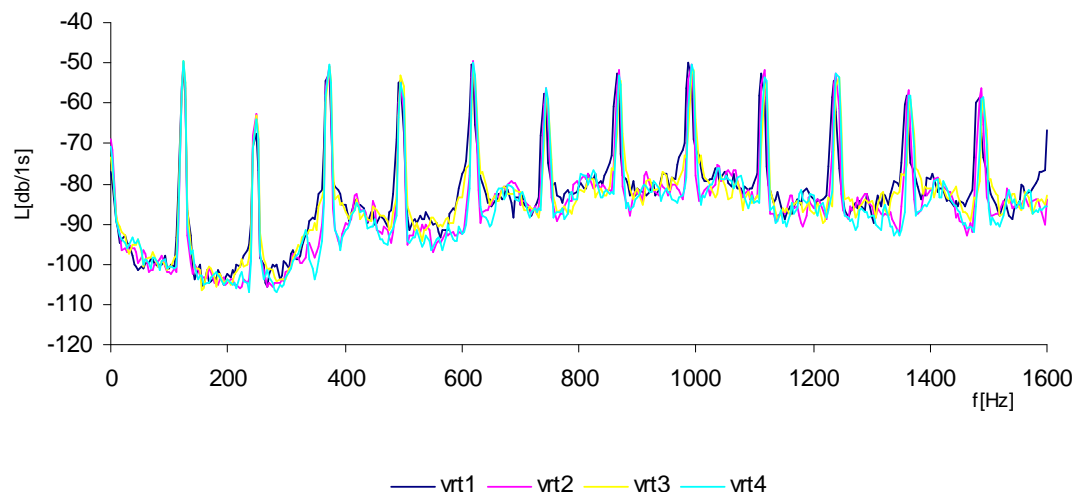
Obr. 118: Průběh 2. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)



Obr. 119: Průběh 3. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)



Obr. 120: Průběh 4. měření spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)



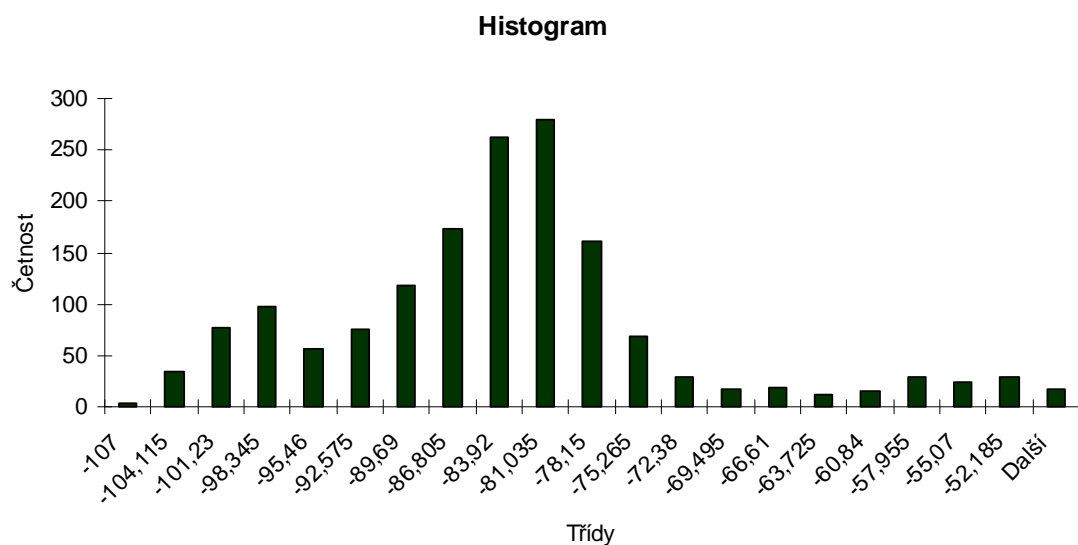
Obr. 121: Průběhy měřených spekter vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)

<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
vrtule1	401	-33467,2	-83,4594	124,8782
vrtule2	401	-34338,8	-85,6329	137,5828
vrtule3	401	-33782,8	-84,2464	119,6973
vrtule4	401	-34541,8	-86,1392	136,942

ANOVA

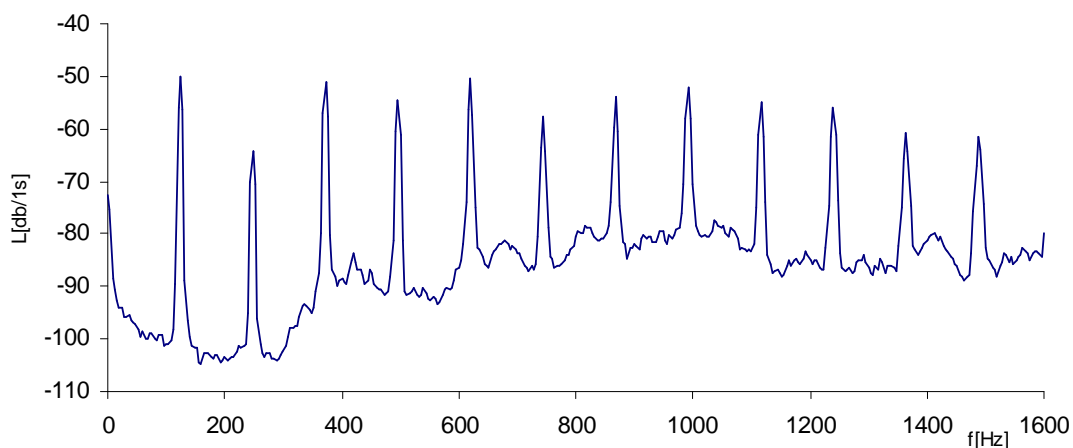
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	1833,218	3	611,0725	4,708705	0,0028134	2,610464
Všechny výběry	207640,1	1600	129,7751			
Celkem	209473,3	1603				

Obr. 122: Statistická analýza naměřených spekter



Obr. 123: Histogram naměřených dat

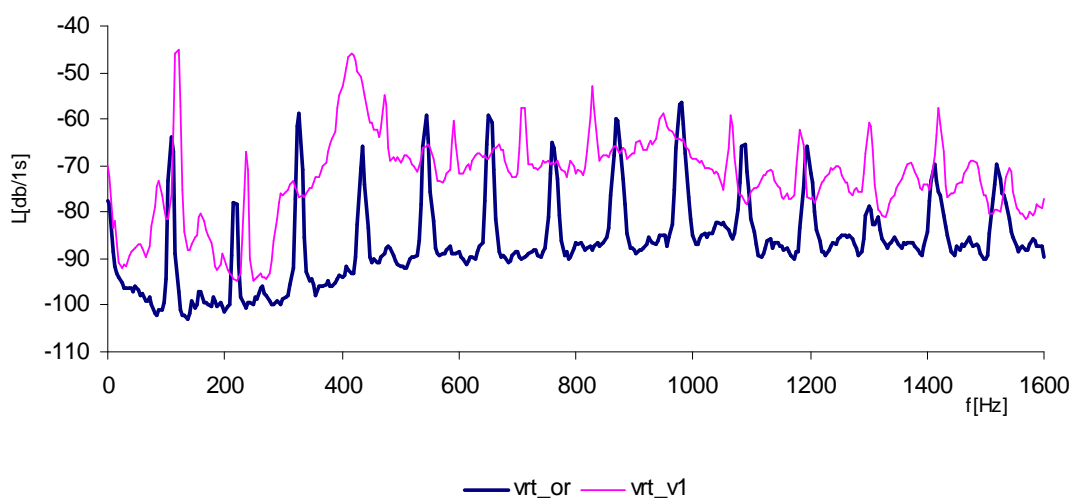
Na zobrazených grafech je měření spektra motoru s velkým zkrácením vrtulky s třetím vyvážením. Průběh spektra je značně podobný původnímu měření vrtulky pouze s malou rozdílnou amplitudou jednotlivých harmonických. Oproti měření se dvěma vyváženími lze pozorovat snížení jednotlivých amplitud harmonických v celém rozsahu spektra, což korektnější vyvážení. Rovněž zaniklo rušení za 3x harmonickou. Otáčky vrtulky jsou na hodnotě 116Hz (tj. 6960 ot/min). Společný graf ukazuje odlišnost jednotlivých měření. Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty pro všech pět provedených měření. Z hodnot průměrů a rozptylů pro jednotlivá měření vidíme minimální rozdíly. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 129,7751. Směrodatná odchylka z toho činí 11,39. Tato hodnota je dostatečně malá, abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si navzájem podobné. Z hodnoty P, která je zde menší než zadaná hodnota α (5%), můžeme vyvrátit nulovou hypotézu, tudíž měření nejsou shodná. Histogram má nesouměrné rozdělení s dvěma vrcholy.



Obr. 124: Průměrný průběh spektra vibrací motoru vrtulky s vyvážením (velká deformace listu vrtulky)

Obrázek 124 reprezentuje průměrný průběh vyhodnocený jako aritmetický průměr všech naměřených spekter signálu.

6.2.11 Výsledky měření vrtulky s velkou deformací



Obr. 125: Porovnání průměrného výsledku měření s původním

Obrázek 125 vyobrazuje srovnání původního měření vrtulky bez deformace (vrt_or) se zkrácenou vrtulkou s prvním vyvážením. Oproti originálu pozorujeme značný nárůst v průběhu spektra indikující velkou dynamickou nevyváženost působící na hřídel motoru. Zanikají i jednotlivé peaky násobků první harmonické frekvence. Následující graf a statistické vyhodnocení charakterizují míru odlišnosti obou průběhů.

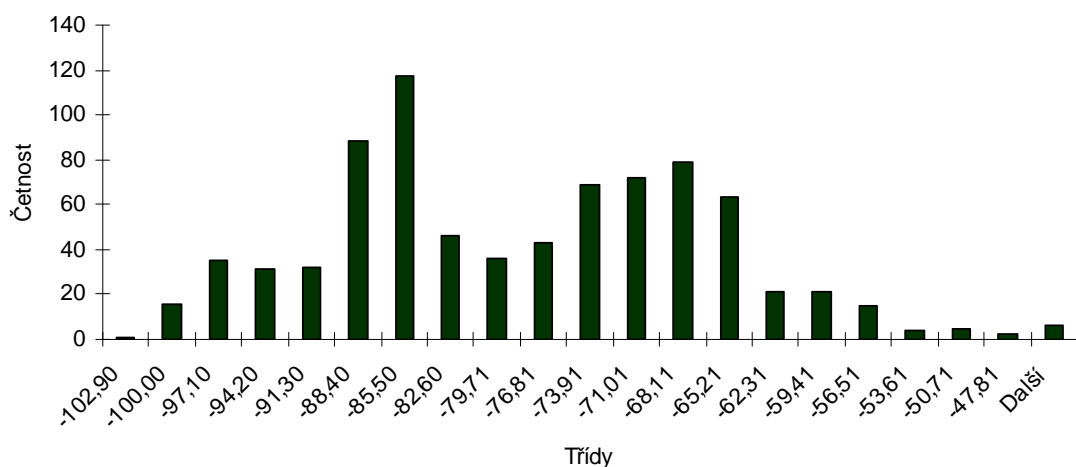
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
vrtule_or	401	-34756,3	-86,6739	83,35105
vrtule1	401	-29050,9	-72,4462	86,58986

ANOVA

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	40586,78	1	40586,78	477,6576	2,154E-83	3,853109
Všechny výběry	67976,36	800	84,97045			
Celkem	108563,1	801				

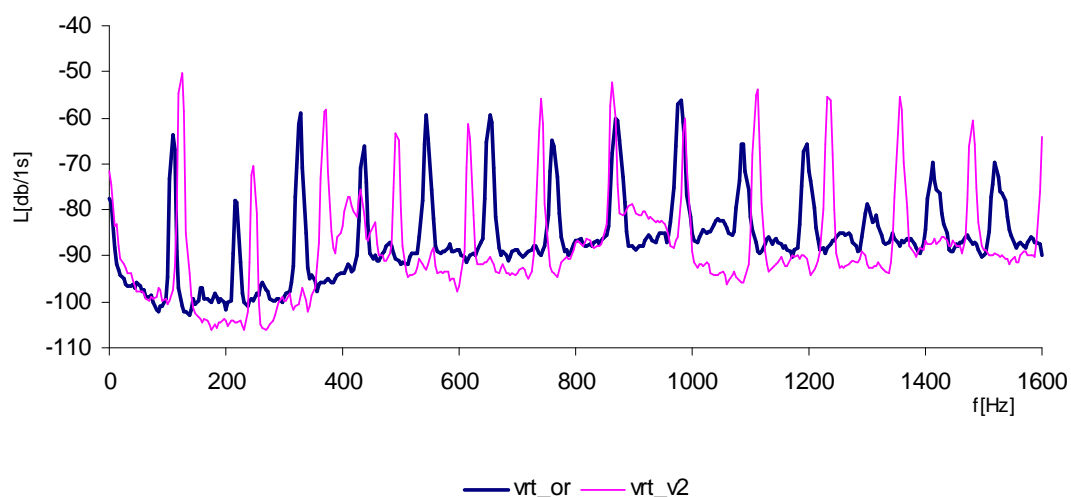
Obr. 126: Statistická analýza naměřených spekter

Histogram



Obr. 127: Histogram naměřených dat

Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty. Z hodnot rozptylu pro jednotlivá měření vidíme minimální rozdíly. Průměr obou měření je v malém. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 84,97045. Směrodatná odchylka z toho činí 9,22. Tato hodnota je dostatečně malá, abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si navzájem podobné. Z hodnoty P, která je zde mnohem menší než zadaná hodnota α (5%), můžeme zamítnout nulovou hypotézu. Což ukazuje nesejnost obou souborů dat. Histogram má nesejné rozdělení s dvouvrcholovou charakteristikou.



Obr. 128: Porovnání průměrného výsledku měření s původním

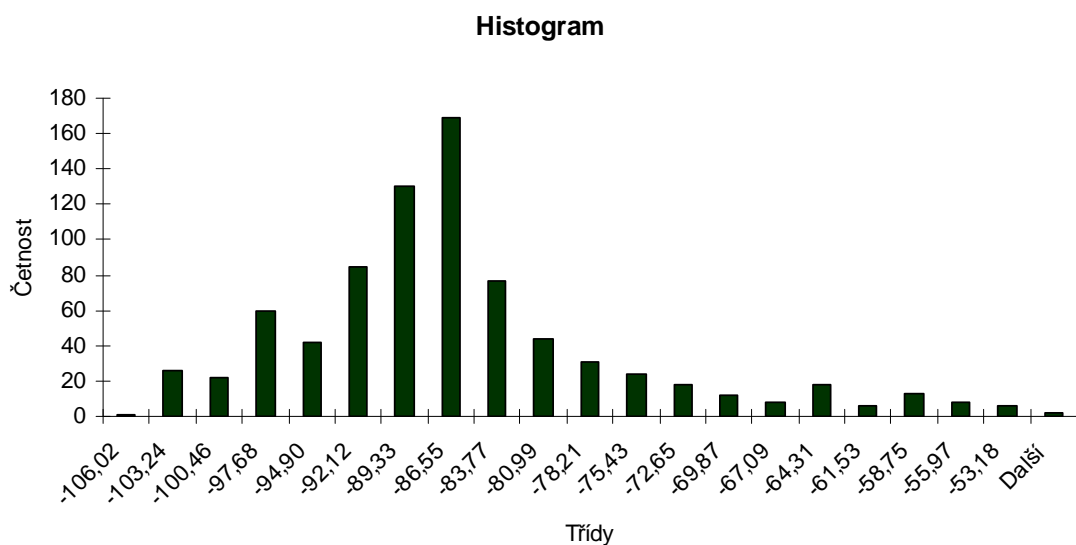
Obrázek 128 vyobrazuje srovnání původního měření vrtulky bez deformace (vr_or) se zkrácenou vrtulkou s druhým vyvážením. Oproti originálu pozorujeme nárůst amplitudy otáčkové frekvence. Průběh spektra se již pohybuje okolo průběhu spektra naměřeného na neupravené vrtulce. Jednotlivé peaky jsou již dobře viditelné i když jejich amplituda je stále vyšší než původní. Vyvážení proto ještě není uspokojivé. Následující graf a statistické vyhodnocení charakterizují míru odlišnosti obou průběhů.

<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
vrtule_or	401	-34756,3	-86,6739	83,35105
vrtule2	401	-35385,8	-88,2439	119,6909

ANOVA

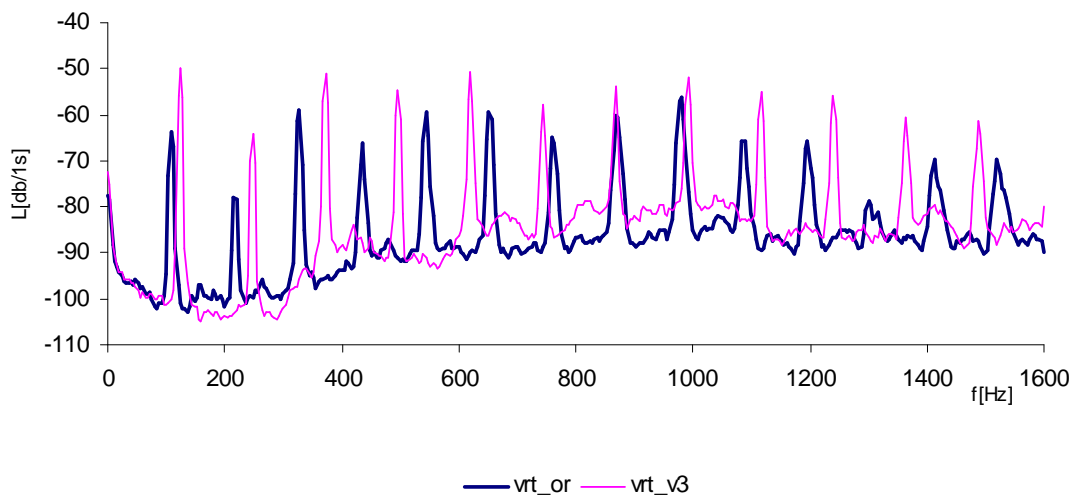
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	494,1567	1	494,1567	4,867533	0,0276501	3,853109
Všechny výběry	81216,78	800	101,521			
Celkem	81710,94	801				

Obr. 129: Statistická analýza naměřených spekter



Obr. 130: Histogram naměřených dat

Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty. Z hodnot průměrů pro jednotlivá měření vidíme minimální rozdíly. Rozptyl obou měření se však příliš neshoduje. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 101,0744. Směrodatná odchylka z toho činí 10,05. Tato hodnota je dostatečně malá, abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si navzájem podobné. Z hodnoty P, která je zde menší než zadaná hodnota α (5%), můžeme zamítnout nulovou hypotézu. Histogram má normální rozdělení.



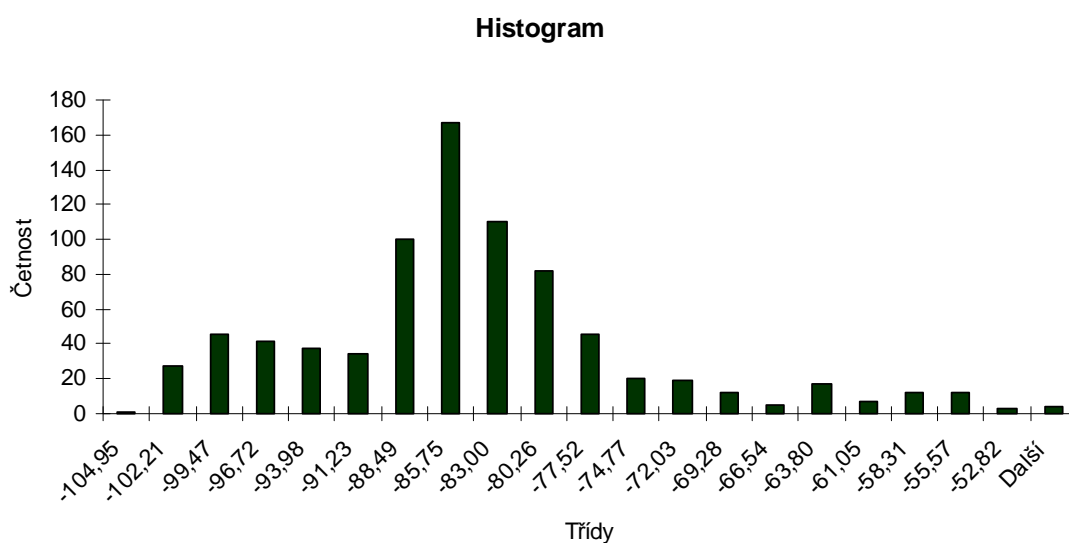
Obr. 131: Porovnání průměrného výsledku měření s původním

Výběr	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl
vrtule_or	401	-34756,3	-86,6739	83,35105
vrtule3	401	-34033,3	-84,8711	120,5004

ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	651,643	1	651,643	6,393313	0,011646	3,853109
Všechny výběry	81540,57	800	101,9257			
Celkem	82192,21	801				

Obr. 132: Statistická analýza naměřených spekter

Obrázek 131 vyobrazuje srovnání původního měření vrtulky bez deformace (vrt_or) se zkrácenou vrtulkou s třetím vyvážením. Oproti originálu jsou stále vidět rozdílné amplitudy jednotlivých harmonických i když oba průběhy vykazují podobný průběh signálu spektrem. Následující graf a statistické vyhodnocení charakterizují míru odlišnosti obou průběhů.



Obr. 133: Histogram naměřených dat

Z tabulky ANOVA lze vyčíst statistické hodnoty. Z hodnot průměrů pro jednotlivá měření vidíme minimální rozdíly. Rozptyl obou měření se však příliš neshoduje. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 101,9257. Směrodatná odchylka z toho činí 10,1. Tato hodnota je dostatečně malá, abychom mohli tvrdit, že jednotlivé soubory dat jsou si navzájem podobné. Z hodnoty P, která je zde menší než zadaná hodnota α (5%), můžeme zamítnout nulovou hypotézu. Histogram má normální rozdělení.

7 Diskuze výsledků

Z naměřených výsledků lze vyvodit následující poznatky. Měření rychlosti otáček ploten disku ukázalo stálost těchto otáček na hodnotě 4648 ot/min. Tuto skutečnost podporuje rovněž výsledek statistické hodnoty směrodatné odchylky, která je svou hodnotou 5,523 na nízké hodnotě. Podle příslušné definice toto vypovídá o vzájemné podobnosti prvků analyzovaných souborů. Průměr jednotlivých měření je na hodnotě cca 111 a rozptyl těchto měření se pohybuje v intervalu od 28,17 do 32,37. Při této příležitosti je třeba dodat, že výsledky analýzy získané z prostředí LabShop, jakožto výstup uložený do formátu .xls, byly přepočteny v prostředí Excel, aby odpovídaly zobrazovaným výsledkům analyzátoru. Přepočet odpovídá hodnotě 10-ti násobku dekadického logaritmu původních dat. Otáčková hodnota, neboli frekvence první harmonické, je v těchto měření vztažena ke klidovým otáčkám disku, kdy nedochází k vyhledávání dat a pohybu hlav disku. Další uvedenou statistickou veličinou je hodnota P. Ta určuje hladinu významnosti, která je v tomto případě 0,1748, čímž akceptuje nulovou hypotézu a připouští stejnost souborů dat. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 30,5119 a slouží jako základ pro výpočet směrodatné odchylky (viz. výše). Uvedený histogram má normální rozdělení ve tvaru klasického zvonu. Největší četnost je při hodnotě y-nové osy na 111,8 (uváděno v absolutních hodnotách) a to v rozmezí tříd od 86,7 do 123. Tyto třídy byly voleny automaticky výpočetním programem. Na porovnání otáček jsem provedl ještě další dvě měření s rozdílným umístěním senzoru. Výsledky byly srovnatelné s výše uvedenými, a proto je zde dále neuvádím.

Následující pojednání bude shrnovat výsledky měření vibrací motorku vrtulky. Měření, která jsem provedl byla v práci systematicky uspořádána, aby bylo možno pozorovat změny v jednotlivých spektrech. Byla provedena měření s různými druhy deformací vrtulky, a to zkrácením jednoho listu vrtulky v rozsahu malé deformace (délka listu 4,5cm) a velké deformace (délka listu 3,5cm). Celková délka listu vrtulky byla 6,3cm. Následně byla provedena tři měření s různým stupněm vyvážení deformované vrtulky a nakonec byly porovnány výsledky těchto vyvážení s originálem, tj. nedeformovanou vrtulkou. Otáčková frekvence byla zvolena zhruba v polovině rozsahu otáček motorku, tj. na hodnotě 112Hz (6720 ot/min).

Z měření nedeformované vrtulky vyšlo následující. Hodnoty průměrů jednotlivých měření se pohybují v rozmezí hodnot 86 až 88, což naznačuje malou diferenci v analyzovaných souborech, ale rozmezí hodnot rozptylu už je značnější (98 až 129). P-value je na hodnotě

0,0081 a spolu s rozptylem naznačují zamítnutí nulové hypotézy o stejnosti analyzovaných dat. Hodnota MS pro všechny výběry je 116,1987 z čehož vypočtená hodnota směrodatné odchylky je 10,78. Toto měření slouží jako výchozí pro porovnání dalších měření. Z následujících odchylek budeme moci lépe posoudit jak se dané soubory analyzovaných dat liší v závislosti na dané deformaci a vyvážení vrtulky.

U malé deformace vrtulky bez vyvážení je vidět mírné zvýšení vibrací v oblasti spektra cca od 380Hz až 1100Hz. Hodnoty průměrů pro tato měření se pohybují v rozsahu 84 až 89 a rozptyl v intervalu 109 až 139. Hodnoty rozptylu zůstaly oproti původnímu přibližně stejné, ale rozsah průměrů se zvětšil. Rovněž hodnota rozptylu všech výběrů stoupla na hodnotu 121,7656 i následná směrodatná odchylka na 11,04. P-value jenom dokresluje nestejnost analyzovaných souborů dat. Uvedený histogram má normální rozdělení.

Spektrum vibrací motorku s malou deformací vrtulky a lehkým vyvážením se již teď značně přibližuje původnímu spektru neupravené vrtulky. Zvýšené vibrace jsou pouze v oblasti 4x. Z hlediska rozsahů průměrů došlo k redukci intervalu na 83-84 i z hlediska rozptylů jednotlivých měření na 126-132. Rovněž p hodnota se významně přiblížila hranici 5% na hodnotu 0,049. Jediným „špatným“ ukazatelem je směrodatná odchylka, která stoupla na hodnotu 11,33. Z toho plyne, že první vyvážení není přesné, ale dostačující.

Měření vibrací motorku s malou deformací vrtulky a dvojitým vyvážením ukázalo rozrušení spektra, jehož důvodem je převážení vyvažované strany listu vrtulky. Rozptyl jednotlivých měření se pohybuje v intervalu 84-116 a průměry v intervalu 79-83. Hodnota rozptylu pro všechny výběry je 99,32564. Směrodatná odchylka z toho činí 9,96. Její pokles je zde významný a sahá dokonce pod hodnotu nedeformované vrtulky. To může být zapříčiněno větší četností průběhu signálu daným pásmem, což naznačuje rovněž tvar histogramu, který má ukázkovou charakteristiku normálního rozdělení. Hodnota p je v tomto případě hluboko pod 5% hranicí.

U posledního měření jsem volil poloviční hmotnost vyvažovací pásky (1,5 čtverce). Z průběhu spektrum je patrný pokles amplitud jednotlivých peaků, což naznačuje korektnější nastavení vyvážení než tomu bylo v předchozím měření. Interval průměrů všech měření je mezi 86 až 88 a interval rozptylů hodnot všech měření je mezi 116-134. Hodnota p je 0,02 což opět zamítá nulovou hypotézu avšak směrodatná odchylka všech výběrů se tímto vyvážením dostala na hodnotu 11,04, což je pokles oproti prvnímu vyvažování. Histogram má normální rozdělení s náznakem nesouměrnosti jako záporné šikmosti.

Z celkového hodnocení všech vyvážení u malé deformace vrtulky na základě hodnot směrodatné odchylky můžeme usoudit, že nejlepšího vyvážení bylo dosaženo s první zátěží

vyvážení (10,05), následovanou třetím měřením (9,7) a konče dvojitým typem vyvážení (9,199). Hodnoty jsou vztaženy ke směrodatné odchylce originální vrtulky (10,78).

U velké deformace vrtulky bez vyvážení je patrné kolísání celého průběhu oproti původnímu spektru vrtulky a jeho celkový postup v ose y. Jednotlivá měření pak vykazují průměry v intervalu 72-75 a rozptyl jednotlivých měření v intervalu 81-107. Směrodatná odchylka má hodnotu 10,06. Ta bude výchozí pro společnou analýzu naměřených výsledků s různým stupněm vyvážení.

Prvním stupněm vyvažování jsme se hodnotou směrodatné odchylky dostali na 9,64. To naznačuje shodnost všech proběhlých měření a tuto myšlenku rovněž podporuje hodnota p, která je 0,745, tudíž nad limitní hodnotou 5%. Interval rozptylu jednotlivých měření je 89-94 a průměr těchto měření se pohybuje na hodnotě 72. Histogram má normální rozdělení s malou zápornou šikmostí nesouměrnosti.

Druhé měření s větším vyvážením vykazuje již shodnější průběh spektra s původním. Oproti měření s jedním vyvážením lze pozorovat výrazné definování jednotlivých harmonických v celém rozsahu spektra, což naznačuje správný postup vyvažování. Jednotlivá měření pak vykazují průměry v intervalu 87-88 a rozptyl jednotlivých měření v intervalu 128-132. Hodnota p přijímá nulou hypotézu a je na hodnotě 0,757, tudíž jednotlivá měření jsou shodná. Směrodatná odchylka činí 11,4.

Poslední měření této deformace s trojitým vyvážením. Oproti měření se dvěma vyváženími lze pozorovat snížení jednotlivých amplitud harmonických v celém rozsahu spektra, což korektnější vyvážení. Rovněž zaniklo rušení za 3x harmonickou. Rozptyl jednotlivých měření je v rozsahu 119-137 a průměry všech měření jsou v intervalu 83-86. Hodnota p tentokrát zamítá nulou hypotézu a činí 0,0028. Směrodatná odchylka vystoupala na hodnotu 11,39, což je ze všech měření nejvýše.

Z celkového hodnocení všech vyvážení u velké deformace vrtulky na základě hodnot směrodatné odchylky můžeme usoudit, že nejlepšího vyvážení bylo dosaženo s posledním pokusem vyvažování (10,05), následovaným dvojitým vyvážením (10,01) a konče prvním jednoduchým vyvážením (9,22). Základní směrodatná odchylka, ke které se porovnávání vztahovalo, byla původní odchylka nedeformované vrtulky (10,78).

8 Závěr

Cílem této práce bylo seznámení se měřícím analyzátozem PULSE a jeho využitím v analýze nízkofrekvenčních signálů. Pro tyto účely jsem vyhotovil dvě laboratorní měření. První z těchto úloh vyhodnocovalo měření vibrací laboratorního harddisku s ohledem na skutečné otáčky hdd. Druhá demonstrační úloha hodnotila chování spektra vibrací motoru s vrtulkou při různých deformacích a vyvažování listu této vrtulky. Z hlediska korektního posouzení naměřených dat byla použita analýza rozptylu (One-Way ANOVA). Každé měření probíhalo v pěti sériích a hodnotila se jejich odlišnost. Jedním ze základních ukazatelů byla směrodatná odchylka (viz kap. 5). Z měření otáček harddisku vyplynulo, že jeho skutečné otáčky laboratorního disku jsou po adekvátním přepočtu na otáčky za minutu jsou na hodnotě 4536 ot/min. Z předpokladu, který byl uveden při rozboru úlohy, vyplývá, že otáčky jsou nižší než předpokládané. Statistické vyhodnocení však prokázalo shodnost všech měření s hodnotou směrodatné odchylky $s = 105,523$.

Měření vibrací motoru vrtulky probíhala opět v sériích po pěti měření s následným hodnocením statistické analýzy a spektra. Z výsledků, která jsou podrobně popsána v části diskuze výsledků, lze vyvodit následující závěry. Z celkového hodnocení všech vyvážení u malé deformace vrtulky na základě hodnot směrodatné odchylky vyplývá, že nejlepšího vyvážení bylo dosaženo s první zátěží vyvážení ($s = 1010,05$), následovanou třetím měřením ($s = 109,7$) a konče dvojitým typem vyvážení ($s = 109,199$). Hodnoty jsou vztaženy ke směrodatné odchylce originální vrtulky ($s = 10,78$). Z celkového hodnocení všech vyvážení u velké deformace vrtulky na základě hodnot směrodatné odchylky vyplývá, že nejlepšího vyvážení bylo dosaženo s posledním pokusem vyvažování ($s = 1010,05$), následovaný dvojitým vyvážením ($s = 1010,01$) a konče prvním jednoduchým vyvážením ($s = 109,22$). Základní směrodatná odchylka, ke které se porovnávání vztahovalo, byla původní odchylka nedeformované vrtulky ($s = 10,78$).

Všechna měření byla podrobena i statistickému hodnocení v prostředí matematického programu MatLab a Excel, jejichž výsledky jsou v práci uvedeny ve formě grafů a tabulek. Samotný systém PULSE představuje významnou pomoc při analýze, monitorování a zpracování signálů ze zkoumaného prostředí. V rámci této práce mi byl vítaným pomocníkem.

9 Literatura

- [1] Tůma J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha 1997. Sdělovací technika s.r.o., ISBN: 80-901936-1-7
- [2] Brüel&Kjaer: *What is PULSE*, <http://www.bksv.com> 2009, <http://www.bksv.com/Products/PULSEAnalyzerPlatform/WhatIsPULSE.aspx>
- [3] Brüel&Kjaer: *Portable PULSE 3560C*, <http://www.bksv.com> 2009, <http://www.bksv.com/Products/PULSEAnalyzerPlatform/PULSEHardware/PortablePULSE3560C.aspx>
- [4] Firemní literatura Brüel&Kjaer: *Měření vibrací, Měření hluku, Vibrační zkoušení*
- [5] Spectris: *PULSE 9*, <http://www.spectris.cz> 2004, <http://spectris.cz/iw/pulse/pulse-9.php>
- [6] Zuth D., Vdoleček F.: *Měření vibrací ve vibrodiagnostice*, časopis AUTOMA 1/2010
- [7] Karas P.: *Registrace obrazu*, Bakalářská práce, Brno 2006, 43s., Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta
- [8] Kreibich O.: *Simulátor vibrací pro experimenty ve vibrodiagnostice*, Praha 2007. 114s., Diplomová práce (Mgr), České vysoké učení technické v Praze, Elektrotechnická fakulta, Katedra měření
- [9] Kreidl M., Šmíd R.: *Technická diagnostika: senzory – metody – analýza signálu*, Praha 2006, 1.vyd., BEN – technická literatura, ISBN 80-7300-158-6.
- [10] Kolektiv firmy SKF, *Průvodce vibrační diagnostikou I*, Praha: SKF Ložiska a.s.,1994
- [11] Bilošová A., Biloš J.: *Vibrační diagnostika*, 2007 VŠB - TU Ostrava, Katedra mechaniky, dostupné na http://www.337.vsb.cz/materialy/vibracni_diagnostika/
- [12] Zuth D., Vdoleček F.: *Měření vibrací ve vibrodiagnostice*, 2010, časopis AUTOMA, dostupný ONLINE na http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=40375
- [13] Kolektiv autorů: *Pevný disk*, dostupné na http://cs.wikipedia.org/wiki/Pevný_disk, 2010
- [14] Koňas P.: *Numerické simulace – typy grafů*, 2010, dostupné na <http://wood.mendelu.cz/cz/sections/FEM/?q=node/82>,
- [15] Kolektiv autorů: *Otáčky za minutu*, 2010, dostupné na http://cs.wikipedia.org/wiki/Otacky_za_minutu